



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**KVANTIFIKACE TEPELNĚ-HYDRAULICKÝCH
CHARAKTERISTIK FLEXIBILNÍHO PRVKU S VYUŽITÍM
EXPERIMENTÁLNÍCH DAT**

QUANTIFICATION OF THE THERMOHYDRAULIC CHARACTERISTICS OF THE FLEXIBLE ELEMENT USING
EXPERIMENTAL DATA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Rostislav Sochorec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Bc. Rostislav Sochorec**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Procesní inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Kvantifikace tepelně–hydraulických charakteristik flexibilního prvku s využitím experimentálních dat

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na praktickou identifikaci reálných tepelně–hydraulických vlastností flexibilního prvku na základě dostupných provozních a experimentálních dat. Účelem je obdržet vypovídající tepelně–hydraulické charakteristiky flexibilního prvku využitelné při jeho praktických aplikacích v oblasti výměny tepla.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámit se s konstrukčním provedením a vlastnostmi flexibilního prvku užívaného v Laboratoři energeticky náročných procesů (LENP).
2. Analyzovat dostupná data z experimentálních aplikací flexibilního prvku v LENP, případně realizovat cílené experimentální měření, a na základě experimentálních dat kvantifikovat tepelně–hydraulické vlastnosti flexibilního prvku.
3. Vytvořit praktické výpočtové vztahy pro stanovení přestupu tepla a tlakových ztrát flexibilního prvku.
4. Provést shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

LUDVIG, E.E.: Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants, vol. 1, 3rd.ed., Gulf Publishing Company, Houston, TX, 1999.

VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen Ed., VDI Heat Atlas, Second Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá stanovením tepelně-hydraulických vlastností vlnovcového flexibilního prvku vyjádřených součinitelem tření a součinitelem přestupu tepla. Flexibilní prvek představuje snadno tvarovatelnou, nerezovou, ocelovou trubku, využívanou v běžných instalatérských aplikacích na stavbu potrubních rozvodů jako alternativu k běžnějším měděným či plastovým potrubím. Další možnou aplikací, danou jeho specifickými vlastnostmi, je jeho použití jako výměníku tepla nekonvenčních tvarů. Konkrétním řešeným případem je produkt společnosti *flexira s.r.o.* prodáváný pod obchodní značkou *xConnect System*. Tepelné charakteristiky jsou stanoveny a základě výstupu z experimentu, který napodobuje jedno z použití v *Laboratoři energeticky náročných procesů* (LENP) ve výzkumném centru *NETME Centre*. Jedná se o ohřev média šroubovicovým topným hadem v konfiguraci voda-voda. V práci jsou popsány typické vlastnosti a aplikace flexibilního prvku a návrh samotného experimentu. Obdržená data jsou pak analyzována ve snaze získat fyzikálně zdůvodnitelnou funkční závislost ke stanovení součinitele přestupu tepla.

Klíčová slova

Bezrozměrná analýza, konvekce, vlnovcová trubka, součinitel přestupu tepla, tepelný výměník, teplo

Bibliografická citace

SOCHOREC, Rostislav. Kvantifikace tepelně-hydraulických charakteristik flexibilního prvku s využitím experimentálních dat. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Zdeněk Jegla. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117680>.

Abstract

The diploma thesis aims to establish thermo-hydraulic properties of a flexible tube described by its Darcy friction factor and film heat transfer coefficient respectively. A flexible tube (corrugated stainless steel tube) is an easily shapeable stainless steel component used to build various piping connections, in a place of more common copper or plastic made tubes. It can also be used to build heat exchangers thanks to its signature properties. The investigated product is the one developed and manufactured by the Czech company *Flexira s.r.o.* and sold under the brand name *xConnect System*. Its thermo-hydraulic properties are established by an experiment, which is based on real utilizations by *Laboratory of Energy Intensive Processes* in NETME (*New Technologies for Mechanical Engineering*) Centre at *Brno University of Technology*. The investigated case is a coil-shaped element serving a purpose of a water-to-water heat exchanger. The text contains a literature survey of the chosen flexible tube and a description of a draft and development of the specific experimental test based off the established theory. The obtained results are then analysed, for the purpose of establishing a functional dependence, which can then be used to calculate a film heat transfer coefficient.

Keywords

Dimensionless Analysis, convection, corrugated tube, heat transfer coefficient, heat exchanger, heat

Prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, které jsem zpracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Jegly, Ph.D. a s použitím odborné literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 4. října 2019

.....
Rostislav Sochorec

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Zdeňku Jeglovi Ph.D. za odborné vedení diplomové práce a poskytnuté informace. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Vítězslavu Mášovi Ph.D., Ing. Mgr. Marku Vondrovi Ph.D. a dalším zaměstnancům Laboratoře energeticky náročných procesů (LENP) za pomoc, čas a trpělivost při konstrukci a provozu okruhu pro sběr experimentálních dat.

Obsah

Úvod.....	8
1 Konstrukční provedení flexibilního prvku	9
1.1 Geometrie flexibilního prvku	9
1.2 Mechanické vlastnosti flexibilního prvku	11
1.2.1 Materiály	12
1.3 Hydraulické vlastnosti.....	14
1.4 Praktické aplikace flexibilního prvku	15
1.4.1 Aplikace flexibilního prvku v laboratoři energeticky náročných procesů .	15
2 Teoretický základ experimentální části	17
2.1 Přenos tepla	17
2.1.1 Kondukce	17
2.1.2 Konvekce	17
2.1.3 Bezrozměrná analýza.....	18
2.2 Tepelná bilance	21
2.2.1 Prostup tepla	21
2.2.2 Ohřev náplně.....	22
3 Experimentální část.....	24
3.1 Návrh měření	24
3.2 Příprava měřených vzorků.....	26
3.2.1 Lisování a řezání flexibilního prvku.....	26
3.2.2 Zajištění stability.....	28
3.3 Experimentální měřicí trať	28
3.3.1 Konstrukční provedení	28
3.3.2 Měřicí technika.....	29
3.4 Měření	30
3.5 Naměřená data	32
3.5.1 Měření 1.....	33
3.5.2 Měření 2.....	34
3.5.3 Měření 3.....	35
3.5.4 Měření 4.....	36
3.5.5 Ostatní měření	37
4 Analýza naměřených dat	39
4.1 Volná konvekce.....	40
4.2 Nucená konvekce.....	44
4.3 Určení bezrozměrných čísel	45
4.4 Stanovení obecného vztahu	51

Závěr	56
Seznam zdrojů	58
Tabulky	60
Grafy	61
Obrázky	62
Symboly	63

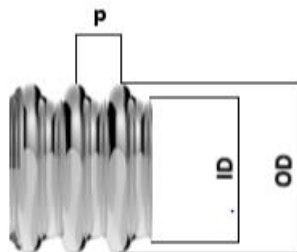
Úvod

Diplomová práce je zaměřená na analýzu dostupných dat z aplikací flexibilního prvku v Laboratoři energeticky náročných procesů (dále LENP) v Centru nových technologií pro strojírenství (NETME) s cílem získat praktické vztahy využitelné pro predikci jeho tepelně-hydraulických vlastností. Flexibilním prvkem je v tomto případě myšlena vlnovcová trubka, v zahraniční literatuře označovaná jako CSST (Corrugated stainless steel tubing), která v běžných instalátérských aplikacích slouží ke stavbě potrubních rozvodů jako alternativa ke standardně používaným trubkám z mědi nebo z plastu. Charakteristickou vlastností těchto trubek je jejich tvarovatelnost. Lze je tvarovat rukou a po ohnutí si dále zachovávají tvar. Propojení s potrubním systémem jiného typu nevyžaduje zvlášť školenou obsluhu. Trubky jsou vyrobeny z kvalitních korozivzdorných ocelí, díky čemuž mají vysokou mechanickou i chemickou odolnost.

Vzhledem k výše uvedeným vlastnostem jsou trubky z vlnovce využívány pracovníky LENP i ke konstrukci improvizovaných tepelných výměníků. Existují zavedené postupy výpočtů tepelně-hydraulických vlastností tepelných výměníků konvenčních geometrií včetně trubek s podélně žebrovaným povrchem, sloužícím ke zlepšení teplosměnných vlastností vlivem zvětšení teplosměnného povrchu. Diplomová práce se tak zabývá odvozením příslušných výpočtových vztahů pro případ vlnovcové trubky (flexibilního prvku), která má zvlnění příčné. Odvození je založeno na principu bezrozměrné analýzy. Vzhledem k omezenému rozsahu experimentálních dat lze očekávat, že podobně jako u konvenčních trubkových výměníků, bude obecné odvození tepelně-hydraulických vlastností, vzhledem k množství proměnných, problematické, a tudíž výsledky budou aplikovatelné pouze v omezeném spektru aplikací.

1 Konstrukční provedení flexibilního prvku

Flexibilním prvkem, jehož tepelně-hydraulické vlastnosti jsou předmětem diplomové práce, je myšlena trubka s příčně zvlněným povrchem, vlnovcem – viz obr. 1. Tento prvek je snadno tvarovatelný rukou do jakéhokoliv tvaru daného pouze omezeními uvedenými v následující kapitole 1.2.



Obr. 1 Geometrie flexibilního prvku [1]

Trubka si po ohnutí drží svůj tvar, je tedy možno sestavit potrubní trasu jen s minimem nutných tvarových prvků. Trubky jsou vyrobeny z kvalitní korozivzdorné oceli, díky čemuž je lze použít ve styku s celou řadou procesních médií, jak bude v další části práce blíže popsáno. Všechny tyto zmíněné vlastnosti z nich činí vhodný nástroj i ke konstrukci trubkových tepelných výměníků nekonvenčních tvarů. Konkrétní konfigurace, které jsou používány v Laboratoři energeticky náročných procesů, budou dále představeny v kapitole 1.4. V LENP jsou k těmto účelům konkrétně využívány vlnovcové trubky společnosti *Flexira s.r.o.*, která tyto trubky dodává společně s dalším příslušenstvím pro stavbu potrubních systémů pod obchodním názvem *xConnect System*. [1]

1.1 Geometrie flexibilního prvku

Flexibilní prvek má tvar vlnovce. Vlnovcem je myšlena trubka s příčně zvlněným profilem stěny. Rozměry flexibilních prvků dodávaných jmenovitých světlostí (**DN**), jsou uvedeny v následující tabulce 1, rozměrové tolerance jsou potom uvedeny dále v tabulce 2 na další straně.

Tabulka 1: Rozměry dodávaných flexibilních prvků [1]

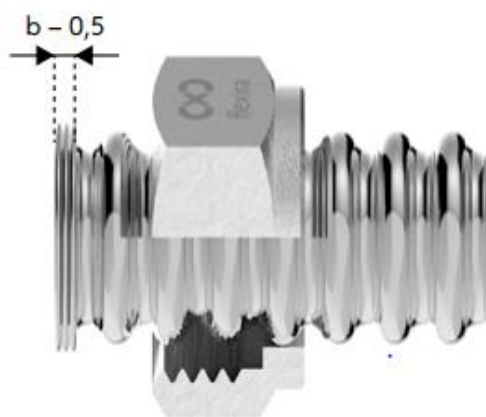
	ID	OD	p	Δ	m	s	V
	mm	mm	mm	mm	kg·m ⁻¹	m ² ·m ⁻¹	l·m ⁻¹
DN08	8,1	11,7	4,2	0,26	0,10	0,0502	0,068
DN12	12,0	15,6	5,0	0,3	0,14	0,0607	0,137
DN15	15,7	20,1	5,5	0,3	0,18	0,0792	0,235
DN18	17,8	21,6	5,0	0,3	0,20	0,0844	0,272
DN20	19,7	25,0	6,4	0,3	0,23	0,1043	0,366
DN23	23,0	27,9	6,5	0,3	0,25	0,1115	0,477
DN25	26,5	32,8	7,1	0,3	0,32	0,1435	0,655
DN32	33,0	41,0	7,6	0,25	0,48	0,1874	1,005
DN40	40,0	47,7	8,8	0,25	0,57	0,2097	1,422
DN50	51,0	61,0	9,4	0,25	0,84	0,2875	2,339

Jednotlivými rozměry v tabulce 1, jsou vnitřní průměr (**ID**) vlnovce, vnější průměr (**OD**) vlnovce, roztečná vzdálenost (**p**) jednotlivých vln, tloušťka stěny (**δ**) trubek. Hmotnost (**m**), vnější povrch (**s**) a objem (**V**) jsou vztaženy na jeden metr délky trubek. Pro bližší představu, jsou tyto rozměry demonstrovány na výše uvedeném obr. 1. [1]

Tabulka 2: Rozměrové tolerance flexibilního prvku [1]

	DN08	DN12	DN15	DN18	DN20	DN23	DN25	DN32	DN40	DN50
	Mm	mm	Mm	Mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
ID	+0,4 -0,2	+0,4 -0,2	0,4 -0,2	0,4 -0,2	+0,4 -0,2	+0,4 -0,2	+0,4 -0,2	+0,4	+0,4	+0,4
OD	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	+0,4	+0,4	+0,4
p	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,3	±0,4	±0,4	±0,4
δ	±0,02	±0,02	±0,02	±0,02	±0,02	±0,02	±0,02	±0,02	±0,02	±0,02

xConnect System, jak už název napovídá, je systémové řešení, které umožňuje snadné budování potrubních rozvodů pomocí výrobcem dodaných spojovacích a tvarových prvků, jimiž jsou redukce, vsuvky, přechodky a T-kusy. Dále je dodáván mechanismus, jímž lze konce trubek zakončit do podoby, jež umožňuje jejich vzájemné propojení, jak v rámci systému, tak s protikusem potrubního systému jiného typu. K tomuto účelu je používán výrobcem dodaný pákový lis *T120*, který bude dále představen v kapitole 3.2. Lis na konci trubky vytvoří dosedací plochu pro těsnění, tak jak je znázorněno na obr. 2. Při zakončení dojde ke zkrácení trubky o tři vlnky z obou stran, je tak třeba počítat s přesahem při zkracování trubek na požadovanou délku.[1]



Obr. 2 Slisovaný konec flexibilního prvku [1]

Legenda – (**b**) šířka slisovaných vln

Velikosti slisované plochy pro odpovídající jmenovité světlosti trubek jsou dále uvedeny v tabulce 3. Tento způsob (*xConnect Sytem T*) je použit v experimentální části práce (kapitola 3.2), kde je popsán postup lisování dle poskytnutého návodu. Lisovat lze trubky o velikostech uvedených v tabulce 3, pro něž jsou k dispozici velikostně odpovídající převlečené matice a čelisti pákového lisu. Alternativou k lisování je těsnění O-kroužky navlečenými na trubku. Převlečená matice je v tomto případě zajištěna zajišťovacím kroužkem. Tento způsob (*xConnect System O*) umožňuje zakončit trubky jmenovitých světlostí uvedených v tabulce 3 (s výjimkou DN18 a DN23), navíc lze zakončit i trubky jmenovitých světlostí DN32.[1]

Tabulka 3: Rozměry slisovaných zakončení trubek [1]

Jmenovitá světlost	Závít převlečené matice	Průměr dosedací plochy	Šířka slisovaných vln (b)
		[mm]	[mm]
DN08	G3/8"	13,0	2,1
DN12	G1/2"	17,1	2,8
DN15	G3/4"	21,7	2,8
DN18	G3/4"	23,1	2,8
DN20	G1"	26,7	3,1
DN23	G1"	29,8	3,2
DN25	G5/4"	35,1	3,2

Oba systémy umožňují snadnou montáž bez nutnosti kvalifikované obsluhy, jelikož zde odpadá nutnost pájených či svařovaných spojů. Pro ostatní velikosti nebo jiné specifické podmínky požadované zákazníkem pak výrobce provádí zakončení slisováním, připájením nebo přivařením libovolných koncovek příslušných velikostí. Samotné trubky jsou dodávány v rolích po 5, 30 a 60 m. Délková odchylka rolí je $\pm 0,5$ %.[1]

Trubky je možno krátit speciálním řezákem (také součástí *xConnect System*). Výrobce dodaný Řezák *O&T 250* (blíže popsán v kapitole 3.2, kde je demonstrován návod k jeho použití) je přímo uzpůsoben ke zkracování vlnovcových trubek, tak aby nedocházelo k deformaci okolních vlnek při řezání.

1.2 Mechanické vlastnosti flexibilního prvku

Kombinace pevnostních charakteristik a elastických vlastností je docílena výrobní technologií. Vytvoření vlnovcového profilu v korugačním zařízení způsobí změnu krystalické struktury materiálu. Následným tepelným zpracováním, žháním v ochranné atmosféře vodíku, je dosaženo zvýšení pevnosti.[2]

Trubku lze zatěžovat do hodnoty maximálního provozního tlaku. Ten se liší pro zvolené médium a použitý typ zakončení potrubního systému. V tabulce 4 jsou uvedeny hodnoty maximálního provozního tlaku pro běžně používanou variantu s převlečenou maticí zajištěnou slisovanou plochou. Maximálním provozním tlakem se v tomto případě myslí přetlak při teplotě 20 °C. Obecně platí, že plynový potrubní systém bude mít řádově vyšší maximální provozní tlak v případě, jsou-li koncovky připájené, či přivařené.[1]

Tabulka 4 – Maximální provozní tlaky vybraných trubek a médií [1]

Médium	Maximální provozní tlak [bar]
Trubky (DN08 ÷ DN25) s lisovanou koncovkou	
Plyn	0,5
Voda	10
Ostatní média	16

Výrobce jsou povolena následující procesní média [1]:

- plyn;
- voda, pitná voda;
- kapaliny pro chladicí a otopné systémy;
- tlakový vzduch;
- pára;
- vakuum.

Provozní teplota je stanovena na základě dílu s nejmenší teplotní odolností, což v případě potrubních systémů bývají pryžová těsnění. Konkrétní těsnění použitá v experimentální části diplomové práce jsou, jedny z výrobce doporučovaných, těsnění (REINZ AFM 34), která mají maximální provozní teplotu 200 °C. Vlnovcový prvek není schopen kompenzovat torzní pohyb. Při zatížení krutem může dojít k povolení závitového spoje. Kompenzovány nejsou ani tepelné dilatace a vibrace. Povoleno není osově ani kolmým zatížením tahem ani tlakem, které vede ke změně rozměrů trubky. Trubky je povoleno ohýbat pouze rukou, a to až po nasazení převlečených matic. Nesmí být formovány krutem ani tahem. Je snaha, aby rovnoběžnost dosedací plochy pro těsnění a příslušného protikusu byla zajištěna již při montáži pro zabránění případných netěsností. Minimální přípustný poloměr ohybu je dále uveden v tabulce 5.[1]

Tabulka 5 – Minimální přípustný poloměr ohybu trubky [1]

Světlost trubky	Minimální přípustný poloměr ohybu
-	[mm]
DN08	16 mm
DN12	25 mm
DN15	25 mm
DN18	30 mm
DN20	30 mm
DN23	45 mm
DN25	45 mm

1.2.1 Materiály

Materiál uplatňovaný při výrobě nerezových vlnovcových trubek je dle [1] chrom-niklová korozivzdorná ocel různých tříd (dále uvedených v tabulce 6) známá jako chirurgická ocel. Tyto oceli obsahují vysoký podíl chromu (10,5 % a více). Chrom reaguje se vzdušným kyslíkem, a vytváří tak na povrchu oceli pasivní vrstvu, která chrání ocel před korozí. Je třeba dbát na to, aby tato pasivní vrstva nebyla narušena, a ocel tak neztrácela své protikorozi vlastnosti. Pasivní vrstva se sice samovolně obnovuje, ale při jejím narušení (struska, barvy, trhliny, spáry) může docházet k důlkové (bodové) korozi na nechráněném povrchu oceli v korozním prostředí.[1],[3]

Ke galvanické korozi dochází, dostanou-li se do styku dva různé kovové materiály. Je-li tento navíc spoj smočen v elektrolytu, dojde ke vzniku galvanického článku. Urychlí se tak korozní napadení méně ušlechtilého kovu (prvky s kladným elektrodovým potenciálem dle Beketovovy řady napětí kovů). V běžných provozních podmínkách bývá korozivzdorná ocel obvykle ušlechtilejším materiálem v porovnání s nelegovanými (a nízkolegovanými) oceli, hliníkem či mědí.[3],[4]

Tabulka 6 – Materiály jednotlivých komponentů [1]

Trubky	Korozivzdorné oceli <ul style="list-style-type: none"> • 1.4301 (AISI 304) • 1.4306 (AISI 304L) • 1.4404 (AISI 316L)
Zakončovací prvky	Korozivzdorná ocel (1.4301) Mosaz (CuZn39Pb3)
Redukce, vsuvky	Mosaz (CuZn39Pb3)
T-kusy, rozdělovače	Korozivzdorná ocel (1.4408) Mosaz (CuZn39Pb3)
Těsnění	Klingersil C4400 Reinz AFM 34
Materiály splňují hygienické požadavky dané vyhláškou 409/2005 Sb pro styk s pitnou vodou.	

Rizikovými faktory, které mohou způsobit korozní napadení nerezové oceli, jsou zvýšená koncentrace chlóru (nad $1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ koncentrace v kapalině), usazování rozpuštěných solí na povrchu oceli (zabránění přístupu kyslíku), změna pH roztoku (za bezpečné je považováno rozmezí pH $7,2 \div 7,6$), kombinace kondenzace chlóru a vody, a možný vznik galvanického článku (je vhodné dva rozdílné kovy odizolovat). Obecně je třeba bránit mechanickému poškození trubky a kontaminaci jejího povrchu částicemi jiných kovů. Nepoužívají se kovové nástroje pro manipulaci s trubkou, nedoporučuje se nanášení nátěrů či barev. V případě uložení trubek v agresivním prostředí je lze vybavit opláštěním (obr. 3). Jedná se o plastový obal pevně nanesený na trubku při výrobě. Účelem je tedy ochrana před výše popsány vlivy ohrožujícími antikorozi vrstvu. Běžná tloušťka opláštění je $0,5 \div 1 \text{ mm}$, a jeho teplotní odolnost je $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro plynovody se pak používá k podobnému účelu plastová chránička, která je volně na trubku volně navlečená až při montáži, a slouží také jako ochrana před únikem plynu do okolí.[1]



Obr. 3 Opláštění pro zvýšení chemické odolnosti trubky [1]

1.3 Hydraulické vlastnosti

Jedním z předmětů zájmu konstruktéra pracujícího s vlnovcovými trubkami jsou tlakové ztráty protékající tekutiny. Způsobeny jsou především zvlněním trubky, kde dochází v oblasti změny profilu trubky k intenzifikaci víření, vlivem odtrhávání mezní vrstvy. Jedná se o kinetickou energii nenávratně disipovanou ve formě tepelné energie. Dá se tak předpokládat, že v porovnání s rozvody jiných materiálů, budou ztráty na rozvodech z vlnovce vyšší [5]. Lze předpokládat, že režim proudění v potrubí bude nabývat vysoce turbulentního charakteru. Z toho důvodu bude docházet k samovolnému čištění, a trubky se tak budou ve srovnání s alternativami méně zanášet [1].

Rovný úsek, dlouhý 1 m, hladké měděné trubky 18x1 (vnější průměr je 18 mm; tloušťka stěny je 1 mm) bude mít tlakovou ztrátu **21 mbar**, při průtoku 20 l·min⁻¹. Oproti tomu vlnovcový prvek DN15 (OD = 20,1 mm; ID = 15,7 mm) stejné délky bude mít tlakovou ztrátu **85 mbar**, při stejných fyzikálních podmínkách [6]. Pro orientační určení tlakových ztrát je využit výrobcem dodaný soubor, jehož funkce je demonstrována na obrázku 4, kde lze přesně nakonfigurovat požadavky. Zvolit lze geometrické charakteristiky, průtočný průřez (daný konkrétním DN prvku) a délku, trubek, a fyzikální podmínky, teplota a druh protékajícího média. Pro stanovení tlakových ztrát celého potrubního systému lze definovat ohyby trubek (počet, poloměry a úhly ohybů). Tyto ohyby se pak chovají jako místní (kolenové) ztráty [5], a jejich hodnoty jsou měřeny experimentálně. Výstupem pak bude hydraulická charakteristika daného potrubního systému.



Obr. 4 – Příklad práce se souborem k určení hydraulických ztrát [6]

1.4 Praktické aplikace flexibilního prvku

Primárním účelem je především realizace nejrůznějších nepohyblivých rozvodů topných či chladících plynů, tlakového vzduchu a nejrůznějších procesních kapalin, včetně pitné vody. Konkrétně jsou aplikovány k napojení plynovodů na spotřebiče plynu, v topných tělesech nebo jako součást tepelných výměníků či boilerů. *Flexira xConnect system* je také certifikován pro použití k dopojení stabilních hasících zařízení (sprinklerů) k příslušným rozvodům [1].

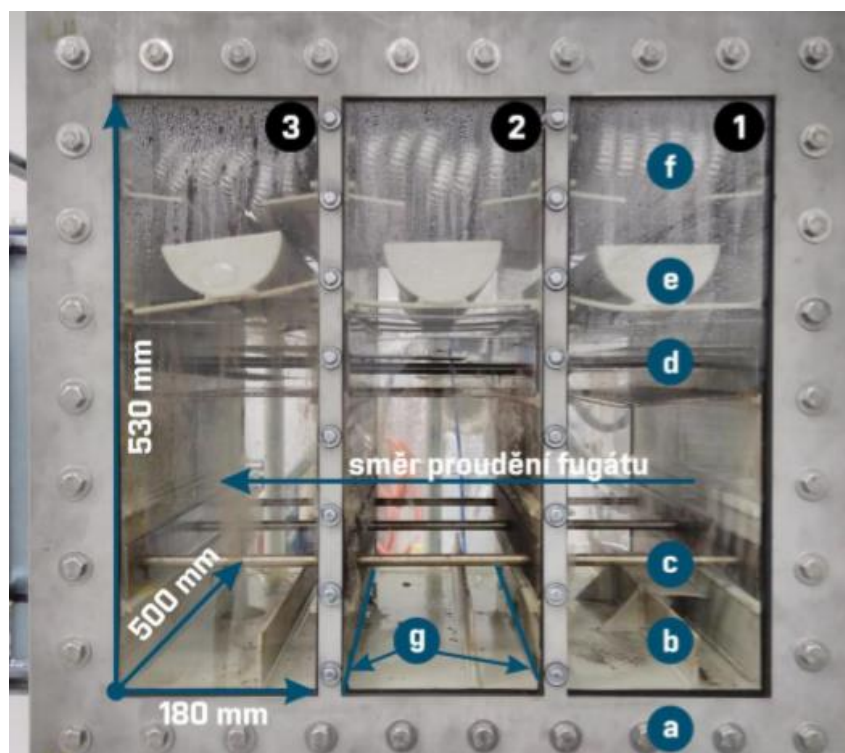
1.4.1 Aplikace flexibilního prvku v laboratoři energeticky náročných procesů

Flexibilní prvek je v LENP, kromě k fyzickému propojení laboratorních zařízení, používán jako tepelný výměník pro ohřev digestátu horkým médiem. Příprava digestátu probíhá jak v uzavřeném zásobníku, viz obr. 4, tak v otevřené nádobě. Jedním z nedostatků této aplikace je její časová náročnost [7]. Určením tepelně-hydraulických charakteristik této aplikace by mohlo vézt ke zlepšení.



Obr. 4 Vlnovcový flexibilní prvek jako tepelný výměník [7]

Další aplikací je jejich použití v experimentální odparce, viz obr. 5 na následující stráně, kde jsou využívány jako tepelné výměníky sloužící ke kondenzaci brýdových par. Odparka je zařízení, kde je přiváděný roztok vypařováním zbavován jeho nejtěkavější složky, čímž dojde k jeho zahuštění (koncentrát). Odpadní (brýdové) páry, což je těkavější látka v plynné fázi, jsou chlazeny chladícím médiem, čímž dojde k jejich kondenzaci za vzniku destilátu. Mezi časté problémy provozu odparek patří potíže s korozí a zanášením teplosměnných ploch, z těchto důvodů se jeví použití nerezového flexibilního prvku jako trubkového výměníku v takovém prostředí jako vhodné.[7],[8]



Obr. 5 Detail experimentální odpařovací jednotky Ing. Mgr. Vondry Ph.D. [7]

Legenda – (1; 2; 3) jednotlivé odpařovací komory; (a) tělo odparky; (b) přepad; (c) výstužná žebra; (d) demister; (e) žlab pro sběr destilátu; (f) tepelný výměník z vlnovcových trubek; (g) otvory pro přechod fugátu mezi jednotlivými odpařovacími komorami

Konkrétní zařízení bylo vyvíjeno Ing. Mgr. Markem Vondrou Ph.D. v rámci jeho disertační práce, jejíž cílem bylo vyvinout prototyp vakuové odparky pro zahušťování digestátu (odpadních vod) z bioplynových stanic. Vakuovou odparkou je myšlena odparka, kde vlivem jejího odvětrání dojde k podtlaku, čímž je snížen bod varu vstupního roztoku. Podtlak může rovněž bránit nežádoucím únikům plynných látek do okolí. Na obr. 5 je vidět uspořádání jednotky této vakuové odparky. Ke kondenzaci brýdových par je použito právě korozivzdorných vlnovcových trubek, které lze, díky jejím mechanickým vlastnostem, uložit do poměrně malého prostoru bez rizika poškození.[7]

Odparka je tepelné zařízení, kde se pracuje se změnou fáze. V důsledku výskytu obou fází je tak komplikována predikce tepelně-hydraulických vlastností z důvodu silně kolísavých fyzikálních podmínek. Při řešení tak záleží na volbě výpočtového modelu, jichž existuje několik a každý dává odlišné výsledky. K výpočtům tepelně-hydraulických podmínek zařízení se změnou fáze jsou v praxi používány speciální komerční matematické softwary [9]. Z těchto důvodů, tak tato aplikace v diplomové práci dále řešena nebude.

2 Teoretický základ experimentální části

Tato kapitola slouží jako teoretický podklad experimentální části diplomové práce (kapitola 3). Každá úvaha či předpoklad, s nímž se bude ve výpočtové části pracovat, se bude opírat o poznatek z odborné literatury nebo odvození uvedené v této kapitole.

2.1 Přenos tepla

Aby byl konán přenos tepla, musí mezi soustavami existovat rozdíl teplot (teplotní spád). Je-li mezi soustavami teplotní spád, dochází k přenosu tepelné energie proti směru stoupající teploty, což vyplývá z Clausiovy formulace druhého termodynamického zákona, který je dle [10]:

Teplo nemůže samovolně přecházet z tělesa o teplotě nižší na těleso o teplotě vyšší.

V našem případě se zaměřujeme na přenos tepla mezi povrchem pevného tělesa (flexibilního prvku) a okolním médiem, a přenos tepla v rámci pevného tělesa (kondukce).

2.1.1 Kondukce

Přenos tepla vedením (kondukce) je popsán Fourierovým zákonem – viz rovnice 1. Ten stanovuje, že měrný tepelný tok (\dot{q}) je v přímé úměře s velikostí teplotního gradientu se záporným znaménkem. Tepelná vodivost (λ), což je fyzikální vlastnost konkrétní látky, je pak konstantou úměrnosti. Z Fourierova zákona lze vidět, že čím je tepelná vodivost látky vyšší, tím je odpor proti toku tepelné energie nižší, tedy při stejném teplotním gradientu je možno tělesem stejného povrchu převést větší množství tepla, pokud je hodnota tepelné vodivosti tohoto materiálu vyšší.[10]

$$\dot{Q} = \frac{\dot{q}}{A} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

\dot{q}	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok
A	[m ²]	teplosměnná plocha
$\frac{dT}{dx}$	[K·m ⁻¹]	teplotní gradient
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	tepelná vodivost stěny

2.1.2 Konvekce

Přenos tepla prouděním (konvekce) tekutého média je dělen podle druhu energie, která vyvoluje pohyb jeho individuálních molekul. Je-li pohyb média vyvolován energií předanou externím zařízením, např. lopatkami čerpadla, jedná se o stav nazývaný **nucená konvekce**. Nucená konvekce se dělí na konvekci s vnějším prouděním, tedy pokud je pevné stacionární těleso obtékáno proudícím médiem. Druhou možností je pak konvekce s vnitřním prouděním, tedy proudění média uvnitř kanálu uzavřeného pevnými stěnami, například v potrubí.[10]

Při zkoumání procesu přenosu tepla prouděním se setkáváme s pojmem mezní vrstva. Mezní vrstvou se myslí oblast, ve které existuje nenulový gradient rychlosti (i teploty) proudění ve směru kolmém k proudnici. Vlivem tření (důsledkem nerovností na povrchu pevného tělesa) a viskozity kapaliny dochází k postupnému zpomalování proudění směrem k povrchu pevného tělesa, kde je rychlost proudění rovna nule. Z termomechanického hlediska pak hovoříme o mezní vrstvě jako o stěnou ovlivněné oblasti, ve které dochází postupně k změně teploty. Mimo tuto oblast je pak teplota považována za konstantní. Platí, že tloušťka mezní vrstvy ve směru proudění roste. Zvětšuje se tak stěnou ovlivněná oblast, čímž dochází k snížení intenzity přestupu tepla. Je tak potřeba rozbíjet mezní vrstvu například vhodně umístěnými výstupky na stěně. Z obdobného důvodu platí, že turbulentní režim proudění výrazně zvyšuje míru přenosu tepla při nucené konvekci s vnitřním prouděním. V takovém případě totiž nedochází k tvorbě mezní vrstvy, a v celém úseku potrubí je tak možno považovat míru úměrnosti přestupu tepla za konstantní.[10]

Místní měrný tepelný tok mezi pevným povrchem a tekutinou je pak definován Newtonovým ochlazovacím zákonem – viz rovnice 2 [10].

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_w - T_\infty) \quad (2)$$

\dot{q}	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok
α	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla
T_w	[K]	teplota povrchu stěny
T_∞	[K]	teplota mimo stěnou ovlivněnou oblast

Konstantou úměrnosti přenosu tepla konvekcí je tedy **součinitel přestupu tepla** (α). Součinitel přestupu tepla udává míru tepelného toku mezi pevnou stěnou a přilehlou tekutinou a je nejpodstatnější veličinou pro inženýrské výpočty.

Volná konvekce je takový stav, jestliže je médium uvedeno do pohybu přirozeným způsobem, například změnil-li se vlivem vzrůstu teploty hustota média, což vede následkem gravitační síly k usazování těžší kapaliny u dna a naopak.[12]

2.1.3 Bezrozměrná analýza

Bezrozměrná analýza je v běžné praxi používána ke stanovování součinitelů přestupu tepla v průmyslových aplikacích. Samotný součinitel přestupu tepla (α) je funkcí šesti proměnných. Jsou jimi rychlost proudění (u), charakteristický rozměr (L), hustota (ρ), kinematická viskozita (ν), měrná tepelná kapacita (c) a tepelná vodivost (λ). Vzájemná fyzikální podobnost je v tomto případě udávána bezrozměrnými konstantami.[10]

$$\alpha = f(u, L, \rho, \nu, c, \lambda)$$

Nusseltovo číslo (**Nu**) je bezrozměrnou reprezentací součinitele přestupu tepla, vyjádřené jako poměr mezi přenosem tepla konvekcí a přenosem tepla kondukcí v mezní vrstvě tekutiny.[12]

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (3)$$

L	[m]	charakteristický rozměr
α	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	tepelná vodivost

Aby bylo možné porovnávat vlastnosti povrchů různých velikostí, je definován charakteristický rozměr (**L**). Tento rozměr je udáván v jednotkových délkových jednotkách, přičemž platí, že při nucené konvekci s vnitřním prouděním je použit hydraulický průměr (**D_H**), který je dán rovnicí 4, umožňující charakterizovat i průřezy nekruhových profilů. Vyplňuje-li průtočný průřez celý profil kruhového potrubí, tedy je-li smáčený obvod roven obvodu potrubí, je průměr potrubí považován za jeho charakteristický rozměr.[11]

$$D_H = \frac{4 \cdot S}{O} \quad (4)$$

D_H	[m]	Hydraulický průměr
S	[m ²]	Vnitřní průřez průtočného profilu
O	[m]	Smáčený obvod

Reynoldsovo číslo (**Re**) udává poměr mezi silami setrvačnými a vazkými. Vazkými silami je myšleno vnitřní tření v důsledku viskozity uvažované kapaliny.[11]

$$Re = \frac{\bar{u} \cdot L}{\nu} = \frac{\rho \cdot \bar{u} \cdot L}{\eta} \quad (5)$$

L	[m]	charakteristický rozměr
\bar{u}	[m·s ⁻¹]	střední rychlost kapaliny v profilu
ν	[m ² ·s ⁻¹]	kinematická viskozita kapaliny
η	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]	dynamická viskozita kapaliny
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota kapaliny

Účelem je stanovení režimu proudění tekutiny v potrubí. Z kapitoly 2.1.2 plyne, že žádoucím režimem proudění je turbulentní režim. Ten nastává, je-li hodnota Reynoldsova čísla vyšší než hodnota Reynoldsova čísla kritického (**Re_k**). Hodnota kritického Reynoldsova čísla pro vodu je uvedena v rovnici 6 [11].

$$Re_k = 2320 \quad (6)$$

Prandltovo číslo (**Pr**) slouží k zohlednění druhu používané tekutiny, stanoveným jejími fyzikálními vlastnostmi. Je tedy především funkcí teploty zvolené tekutiny a lze ho vyjádřit následujícím vztahem [12]:

$$\text{Pr} = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda} = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} \quad (7)$$

ν	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita kapaliny
ρ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	hustota kapaliny
c_p	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	tepelná kapacita za konstantního tlaku
η	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	dynamická viskozita kapaliny
λ	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	tepelná vodivost kapaliny

Grasshofovo číslo (**Gr**) je zavedeno speciálně pro **volnou konvekci**. Jedná se o ekvivalent Reynoldsova čísla, není-li definována rychlost proudění tekutiny. Vyjádření poměru hnacích a vazkých sil je reprezentováno rovnicí 8. Hnací silou je v tomto případě vztlaková síla, která musí překonat vazkou (třecí) sílu tak aby se molekuly tekutiny daly do pohybu. Grasshofovo číslo je definováno rovnicí [12]:

$$\text{Gr} = \frac{L^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\eta^2} \quad (8)$$

L	$[\text{m}]$	charakteristický rozměr
ρ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	hustota kapaliny
g	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$	gravitační zrychlení
β	$[\text{K}^{-1}]$	součinitel objemové roztažnosti kapaliny
ΔT	$[\text{K}]$	teplotní spád mezi stěnou a oblastí stěnou neovlivněnou
η	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	dynamická viskozita kapaliny

Uvedená bezrozměrná čísla jsou navzájem závislá. Tyto vzájemné stavy reprezentuje kritériální rovnice, ze které lze po dosazení všech proměnných vyjádřit hledaný součinitel přestupu tepla (**α**). Kritériální rovnice jsou v obecném tvaru zapsány následujícími funkčními předpisy, kde rovnice 9 platí pro nucenou konvekci.[10]

$$\text{Nu} = A \cdot \text{Re}^B \cdot \text{Pr}^C \quad (9)$$

Rovnice 10 pak reprezentuje přenos tepla volnou konvekci.[10]

$$\text{Nu} = A \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^B \quad (10)$$

Koeficienty A, B a C jsou konstanty definující tvar konkrétní funkční závislosti.

2.2 Tepelná bilance

Dalším z možných způsobů vyjádření součinitele přestupu tepla je pomocí tepelné bilance, tedy vyjádřením množství tepla, které bylo potřeba pro ohřev určitého objemu kapaliny.

2.2.1 Prostup tepla

Flexibilní prvek má funkci tepelného výměníku, tedy zařízení, které přenáší tepelnou energii z média o vyšší teplotě do média o nižší teplotě přes pevnou stěnu. Takový mechanismus je nazýván **prostup tepla**. Tepelný tok je přenášen nejprve mechanismem konvekce z horkého média (T_1) do stěny o teplotě (T_{w1}). Dále je pak difúzně vedeno (mechanismem kondukce) na povrch druhé stěny (T_{w2}) a z druhého povrchu pak do studeného média (T_2). Tepelný tok ve všech těchto fázích zůstává konstantní a je vyjádřen následující rovnicí [10]:

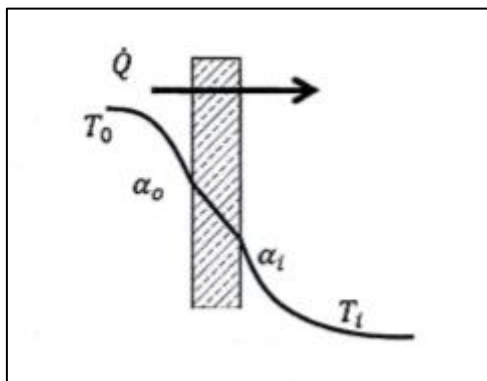
$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (11)$$

\dot{Q}	[W]	tepelný tok
U	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	součinitel prostupu tepla
A	[m ²]	teplosměnný povrch

Mějme rovinnou stěnu (obr. 7) tloušťky (δ) a nekonečné plochy, přes kterou se šíří teplo podle podmínek uvedených v kapitole 2.1.

Aplikací Newtonova ochlazovacího zákona a Fourierova zákona lze vyjádřit tepelnou bilanci prostupu tepla stěnou rovnicí 12, zapsané ve tvaru, kde jmenovatele vyjadřují odpor proti šíření tepla.[10]

$$\dot{Q} = \frac{(T_1 - T_{w1})}{\frac{1}{\alpha_1}} = \frac{(T_1 - T_{w2})}{\frac{\lambda}{\delta}} = \frac{(T_{w2} - T_2)}{\frac{1}{\alpha_2}} \quad (12)$$



Obr. 7 Prostup tepla rovinnou stěnou [10]

Je-li **součinitel prostupu tepla** (U) definován jako konstanta úměrnosti šíření tepla, tedy když s rostoucím součinitelem prostupu tepla roste tepelný tok, lze ho zapsat ve tvaru rovnice 13, kde veličina R vyjadřuje právě odpor proti přenosu tepla.

$$U = \frac{1}{R} \quad (13)$$

Dosazením jmenovatelů z předchozí rovnice 12 lze pak součinitel prostupu tepla zapsat v následujícím tvaru:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (14)$$

Pro velmi malou tloušťku stěny, lze tloušťku stěny zanedbat ($\delta=0$), tudíž součinitel prostupu tepla v takovém případě bude dán:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (15)$$

V případě, že dochází na jedné straně výměníku tepla k nucené konvekci, a na druhé straně dochází k volné konvekci, lze předpokládat, že součinitel přestupu tepla na straně proudícího média bude výrazně vyšší než součinitel přestupu tepla na straně statického média. Dosazením součinitelů přestupu tepla (α) z obou těchto případů do rovnice 15 lze tak vyvodit předpoklad, že součinitel přestupu tepla na straně statického média bude přibližně roven součiniteli prostupu tepla (U).

$$U \approx \min(\alpha)$$

2.2.2 Ohřev náplně

Množství tepla potřebné k ohřátí určitého množství látky o určitou teplotu je vyjádřeno veličinou tepelná kapacita, která je fyzikální vlastností dané látky. Nedochází-li ke změně fáze, lze celkový tepelný tok vyjádřit bilanční rovnicí – rovnice 16.[10]

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_1 - T_0) \quad (16)$$

\dot{Q}	[W]	tepelný tok
\dot{m}	[kg·s ⁻¹]	hmotnostní tok kapaliny
c_p	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita kapaliny za konstantního tlaku

Nechť je jednou ze stran výměníku statická náplň, jež bude ohřívána proudem horké kapaliny o konstantní teplotě. Množství tepla k prohřátí náplně vyjadřuje již uvedená bilanční rovnice, kterou lze zapsat v diferenciálním tvaru – rovnice 17.

$$\frac{d\dot{Q}}{dt} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (17)$$

Rovnici 17 lze doplnit o vyjádření množství tepla z přenosové rovnice (rovnice 11). Potom se obdrží:

$$\dot{m} \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (18)$$

Diferenciální rovnice 18 se dále upraví na tvar vhodný k integraci:

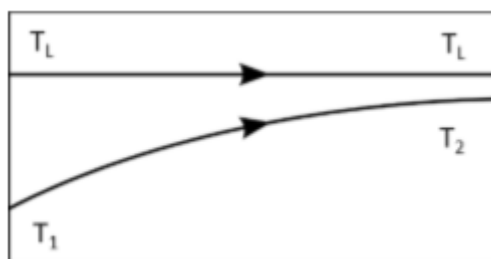
$$\int \frac{dT}{\Delta T} = \int \frac{U \cdot A}{\dot{m} \cdot c_p} \cdot dt \quad (19)$$

$$\int_{T_{c1}}^{T_{c2}} \frac{dT}{T_L - T} = \frac{U \cdot A}{\dot{m} \cdot c_p} \cdot \int_0^t dt \quad (20)$$

Integrací rovnice 20 a dosazením integračních mezí je odvozen konečný tvar rovnice pro dobu ohřevu náplně – rovnice 21.

$$\ln \left(\frac{T_L - T_{c1}}{T_L - T_{c2}} \right) = \frac{U \cdot A}{\dot{m} \cdot c_p} \cdot t \quad (21)$$

Je-li známa celková doba ohřevu náplně (t) v sekundách, lze si vyjádřit součinitel prostupu tepla (U), a za předpokladu definovaném v kapitole 2.2.1 také součinitel přestupu tepla (α) na straně statické náplně. Charakteristický hyperbolický průběh teplot během ohřívání je znázorněn na obrázku 6.



Obr. 8 Předpokládaný průběh teplot ohřevu statické náplně [9]

Legenda – (T_L) teplota horkého média; (T_1) počáteční teplota chladného média; (T_2) koncová teplota chladného média

3 Experimentální část

Jedná se o stěžejní část diplomové práce, kde je na základě poznatků uvedených v předchozí kapitole navrženo a sestaveno experimentální měření. Původním záměrem bylo využití experimentálních dat již naměřených při reálných aplikacích flexibilního prvku v LENP, které byly uvedeny v kapitole 1.4.1. V případě, že data nejsou k dispozici, lze navrhnout a realizovat vlastní experimentální měření, které napodobí jednu z používaných aplikací. Cílem je pak stanovení teplosměnných vlastností flexibilního prvku vyjádřených součinitelem přestupu tepla (α). Testováno je několik vzorků různých parametrů (délka trubky, jmenovitá světlost) a stanovován je pak součinitel přestupu tepla každé konfigurace. Všechny proměnné jsou následně dosazeny do již uvedených bezrozměrných funkčních vztahů. Funkční závislost bezrozměrných čísel udává kritériální rovnice, která byla uvedena v předchozí kapitole v obecném tvaru – rovnice 10. Výstupem diplomové práce tak bude numerické vyjádření koeficientů definujících tvar této funkční závislosti, čehož je dosaženo proložením naměřených dat křivkou pomocí vhodné aproximační metody. Rovnice této křivky je pak považována za výsledný obecný vztah pro odvození součinitele přestupu tepla pro konkrétní řešenou aplikaci. V této kapitole je dále popsáno měření po krocích, tak jak bylo v praxi řešeno.

3.1 Návrh měření

Zvolenou aplikací je ohřev chladného média horkým médiem proudícím flexibilním prvkem. V LENP je tato konfigurace využívána k přípravě digestátu na požadované podmínky pro následná experimentální měření v odparce. K dispozici nejsou experimentální data z předchozí práce s flexibilním prvkem, tudíž je potřeba realizovat vlastní návrh experimentu. Po konzultaci s vedoucím práce a vedoucím laboratoře je nejprve rozhodnuto o vhodné konfiguraci experimentálního výměníku tepla. Ten bude složen z flexibilního prvku uspořádaného do tvaru šroubovice, který je následně umístěn do stacionární nádoby, viz obr. 9 na další straně. Takto připraveným flexibilním prvkem (dále **topným hadem**) je cirkulováno zvolené médium udržované na konstantní teplotě (T_H). Do stacionární plastové válcové nádoby (o průměru 50 cm a celkovém objemu 150 l) je napuštěno chladné médium o počáteční teplotě (T_{C0}). Náplň ve stacionární nádobě je během měření nepohyblivá, jelikož nejsou k dispozici vhodné prostředky pro míchání. Po další konzultaci je také rozhodnuto, že procesními médii budou v obou případech voda. Voda je zvolena z důvodu dobře známých fyzikálních vlastností a snadné dostupnosti v laboratoři. V tabulce 7 jsou uvedeny další vstupní parametry měření.

Tabulka 7 – Vstupní parametry experimentu

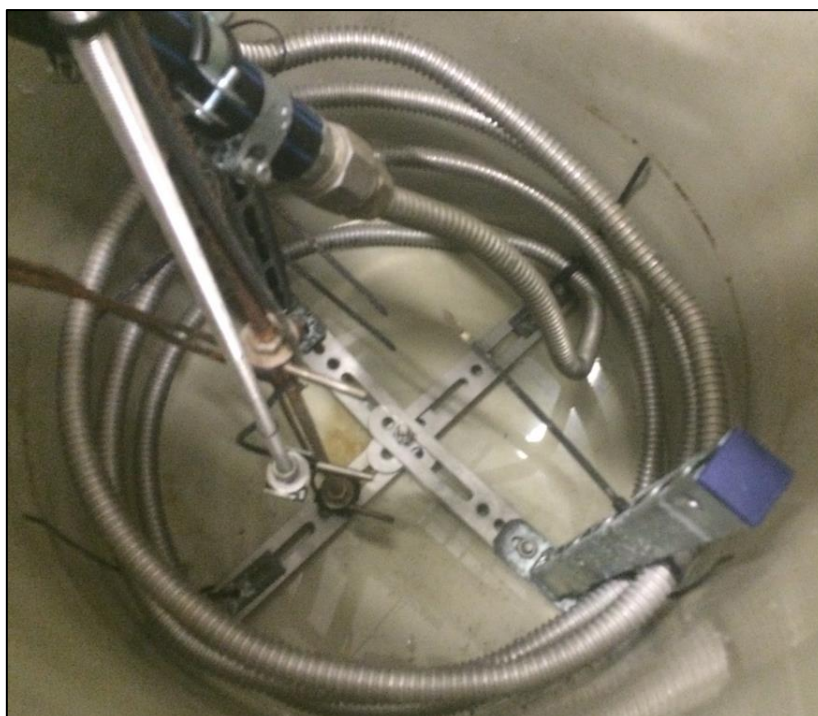
Jmenovité světlosti flex. prvku	DN15 DN12
Délka topného hadu	5000 mm 3000 mm
Parametry stacionární nádoby	$\varnothing D = 0,5 \text{ m}$ $V = 80 \text{ l}$ (<i>objem chladné statické náplně</i>)
Parametry horkého média Počáteční teplota	Voda $T_H = 50 \text{ °C}$
Parametry chladného média Počáteční teplota	Voda (<i>z vodovodního řádu</i>) $T_{C0} \approx 18 \text{ °C}$

Zvoleny jsou vstupní teploty horkého i chladného média. Ty jsou stanoveny jako kompromis mezi předpokládanou délkou měření a tepelnými ztrátami do okolí. Je předpokládáno, že vyšší teploty povedou k rychlejšímu prohřátí náplně, ale vzniklé, tomu odpovídající, teplotní spády povedou k větším ztrátám do okolí.



Obr. 9 Uložení topného hadu v plastové nádobě

V kapitole 2.2.2 byl odvozen očekávaný časový průběh teplot chladné náplně. Změna teploty chladného média v čase se bude postupně snižovat, až dojde k jejímu ustálení (T_{Cr}) na hodnotě, která se bude blížit (T_H) a dále neporoste. To je způsobeno tepelnými ztrátami do okolí, jelikož se nejedná o uzavřenou soustavu. Vzhledem k absenci míchacího zařízení na vyvození pohybu náplně, je dominantním mechanismem šíření tepla v chladné náplni **volná konvekce**. Chladná statická náplň se tak bude prohřívat od hladiny ke dnu, což vyplývá z fyzikálních vlastností vody, která se stoupající teplotou mění svou hustotu. Hustota vody se stoupající teplotou klesá. Pohyb jednotlivých molekul je vyvozován vztlakovou silou danou rozdílnou hmotností různých vrstev kapaliny. Šíření tepla v náplni bude navíc vlivem použité konfigurace tepelného výměníku v blízkosti stěn chaotické. Na výše uvedené aspekty je třeba brát ohled při stanovování, jakým způsobem bude měřena teplota chladného média. Je rozhodnuto, že teplota bude měřena ve třech hladinách, optimálně v ose nádrže. Je však třeba brát v úvahu i konstrukční řešení tepelného výměníku, zejména připojení topného hadu do okruhu s čerpadlem. Konkrétní umístění teploměrů je dále popsáno v kapitole 3.3 kde je popisována měřící trať. Pro získání součinitele přestupu tepla bude snaha o prohřátí celé statické náplně, teploměry tak budou umístěny u dna, uprostřed a na hladině náplně. Umístění teploměrů je dále znázorněno na Obr. 10. Měření bude také průtok pro stanovení Reynoldsova čísla.



Obr. 10 Umístění teploměrů v nádobě

3.2 Příprava měřených vzorků

V této kapitole je postupně v jednotlivých fázích popisován průběh sestavování výměníků tepla pro parametry definované v předchozí kapitole. Nejprve jsou připraveny jednotlivé vzorky, které jsou dále navinuty do tvaru šroubovice. V konečné fázi se tepelný výměník zapojí do měřicího okruhu, dále popsáným v kapitole 3.3., a umístí do použité nádoby. Médium v zásobníku s horkou vodou je prohřáto na požadovanou teplotu, při které bude horké médium prohřívát chladnou náplň. Poté co je ověřena těsnost všech spojů, je možno zahájit samotné měření. Tento postup je dále opakován pro každé z měření. Z časových důvodů jsou měřeny pouze čtyři vzorky. Jednotlivé vzorky jsou definovány v tabulce 8, takže v dalším průběhu práce mohou být pro přehlednost referovány těmito názvy.

Tabulka 8 – Konfigurace použitých flexibilních prvků

Flexibilní prvek	Délka (L)	Jmenovitá světlost (DN)
	mm	Mm
Vzorek 1	5000	15
Vzorek 2	5000	12
Vzorek 3	3000	15
Vzorek 4	3000	12

3.2.1 Lisování a řezání flexibilního prvku

K propojení flexibilní trubky s hadicemi měřicího okruhu je použit systém spojení s lisovanou plochou pro těsnění (*xConnect System T*). Postup, podle návodu dodaného výrobcem, je popsán v následujících bodech:[1]

- Převlečená matice odpovídající jmenovité světlosti je nasazena na trubku.
- Do pákového lisu (*Flexira xConnect System T 120*), viz obr. 11, dodaného výrobcem je umístěna čelist příslušné velikosti.

- Trubka je vložena do čelisti lisu tak, aby došlo ke slisování posledních třech vln.
- Čelisti jsou zajištěny uzamčením.
- Stlačením páky do vodorovné polohy dojde k vytvoření dosedací plochy pro těsnění.
- Správně slisovaná dosedací plocha je bez nerovností.
- Matici pak lze přišroubovat k protikusu se závitem odpovídající velikosti.



Obr. 11 Pákový lis (T120) [1]

Ke zkracování trubek dojde po dokončení měření 5m konfigurací. Zkracování je provedeno dodaným řezákem (Flexira xConnect System O&T 250), viz obr. 12, dle návodu poskytnutým výrobcem v následujících krocích:[1]

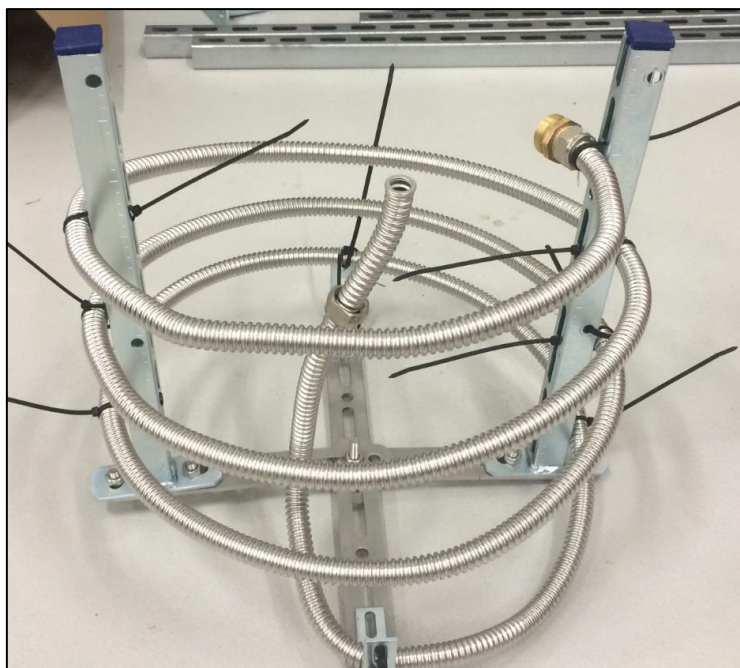
- Nejprve je naměřena požadovaná délka uříznuté trubky.
- Řezák je vložen do této vzdálenosti v místě nejmenšího průměru trubky.
- Točivým pohybem dojde k uříznutí trubky.
- Při řezání je třeba si dát pozor jakým směrem je točeno řezákem. Řezák má tendenci seříznout jednu hranu hladčeji v závislosti jakým směrem řez probíhá.
- Řez na straně, kam bude umístěna převlečená matice, musí být hladký a bez otřepů.



Obr. 12 Řezák O&T 250 [2]

3.2.2 Zajištění stability

Poté co je příslušný topný had vybaven spojovacím prvkem (převlečenou maticí), je svinut do tvaru šroubovice, pokaždé do stejné výšky tak, aby kovový spojovací protikus, ke kterému je převlečená matice přišroubována, nebyl ponořen do náplně a neovlivňoval tak její teplotu. Zároveň se zamezí dotyku topného hadu a stěny nádoby. Upevnění topného hadu je řešeno jeho přivázáním, v místech dotyku, ke kovovým konzolím (obr. 13), které jsou přišroubovány ke konstrukčnímu kříží. Vzhledem k teplosměnným plochám v místech přivázání je předpokládáno, že část tepla je absorbována konzolemi. Topný had je dále přišroubován maticí k protikusu, s odpovídajícím vnějším závitem upevněným v hadicích, jimiž bude cirkulováno horké médium přes výměník. Tím dojde k uzavření měřicího okruhu, jenž je blíže popsán v následující kapitole.



obr. 13 Svinutí flexibilního prvku do tvaru šroubovice

3.3 Experimentální měřicí trať

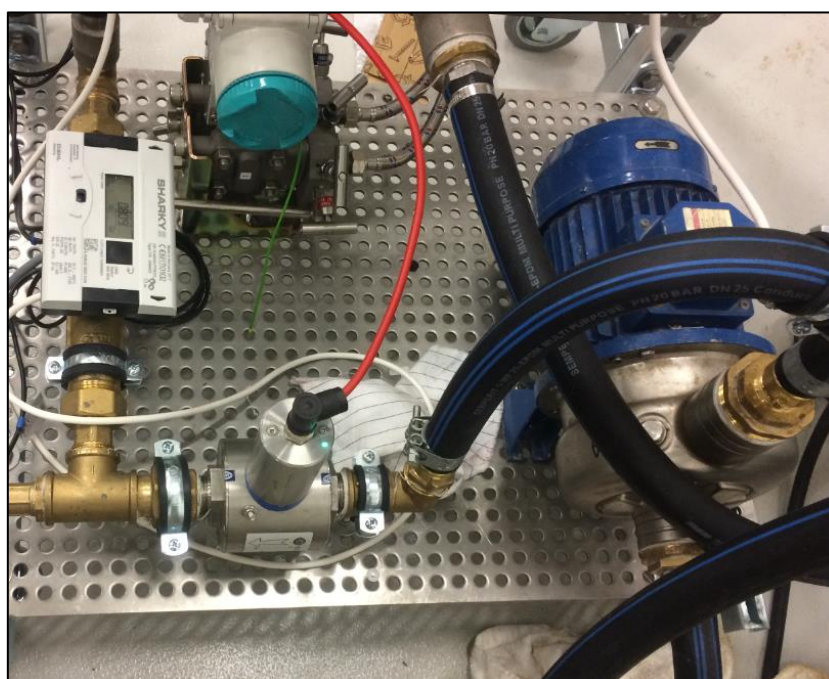
V této kapitole je popsána realizace vhodné experimentální měřicí trati. Konkrétně je popsán způsob řešení experimentálního okruhu s ohledem na, v kapitole 3.1 stanovené, požadované měřené veličiny a vstupní parametry procesních médií. Dále je řešen způsob propojení tepelného výměníku s nádrží horkého média a umístění měřicí techniky. Celé měření je realizováno v prostorách LENP, kde je využíváno pouze dostupných měřících zařízení a konstrukčních prvků.

3.3.1 Konstrukční provedení

K dispozici je mobilní pult s oběhovým čerpadlem (*Sigmat CRX/150*) a potrubní trasou osázenou nejrůznější měřicí technikou, viz obrázek 14 na další stránce. Dále je k dispozici izolovaná válcová nádrž (o objemu 1000 l) s topnými tělesy po obvodu, který lze použít jako zásobárnu horkého média. Jedná se o stejný zásobník, jenž byl používán k přípravě digestátu popsaného v kapitole 1.4.1. Měřicí okruh je vytvořen připojením potrubní trasy mobilního pultu ke koncovce topnému hadu. Voda je

přiváděna, čerpadlem ze zásobníku, a odváděna zpět gumovými hadicemi, které jsou připojené k potrubní trase mobilního pultu příslušnými spojkami.

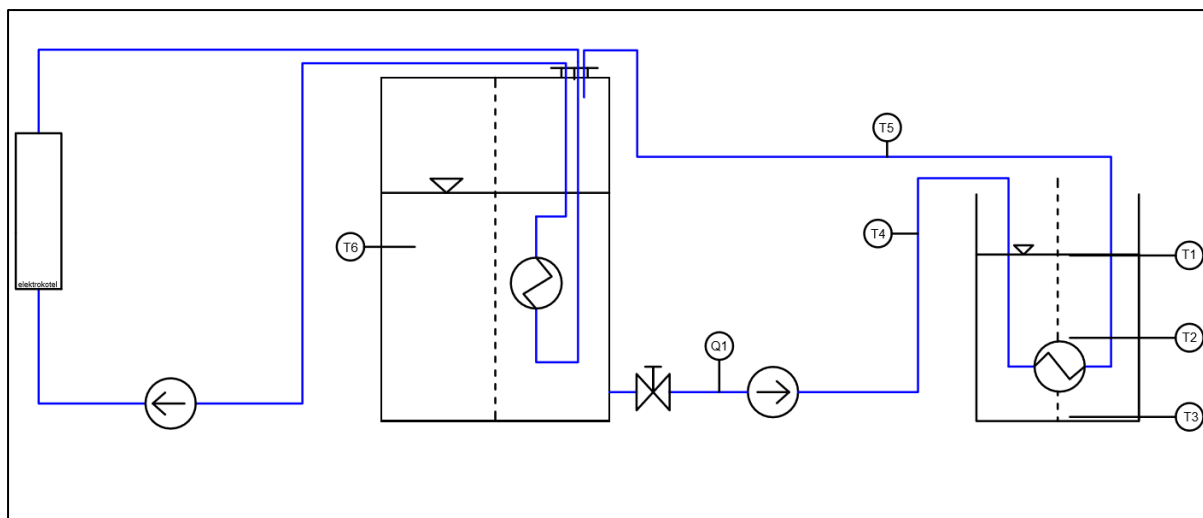
Vodu v zásobníku je třeba nejprve ohřát na příslušnou teplotu. Topné těleso po obvodu nádoby se jeví jako nedostačující, tudíž je potřeba zavést ještě jeden horkovodní okruh, sloužícího k prohřívání náplně zásobníku. Navíc je záměrem udržovat teplotu horkého média (T_H) na konstantní teplotě. K tomuto účelu je použita další uzavřená horkovodní smyčka, kde zdrojem tepla je elektrokotel. Teplosměnnou plochou mezi touto smyčkou a náplní v zásobníku tvoří vlnovcové trubky, uložené skrz horní přírubu do zásobníku obdobně jako v případě představeném v kapitole 1.4.1. Při přípravě náplně v zásobníku na požadovanou teplotu je použito i, v zásobníku instalované míchadlo k intenzivnějšímu a rovnoměrnějšímu ohřevu. Kompletní schéma obou okruhů je znázorněno na obr. 15 na další straně.



obr. 14 Detail potrubní trasy na mobilním pultu

3.3.2 Měřicí technika

V této kapitole je komentována volba měřících prvků, a jejich funkce a umístění do měřící trati. V kapitole 3.1 je na základě teoretického rozboru odhadnut pravděpodobný způsob šíření tepla v chladné náplni, a tedy i její prohřívání, které nebude rovnoměrné. Je tak rozhodnuto, že se teplota chladného média bude měřit ve třech hladinách. K tomuto účelu jsou využity dva stojany osázeny již zmíněnými teploměry. Měřena je i teplota horkého média na vstupu do výměníku, tak aby bylo možno kontrolovat její hodnoty v reálném čase za účelem kontroly fluktuací. Při měření však přesto bude docházet k mírným fluktuacím teploty horkého média. K dosažení do výpočtových vztahů tak bude nutné použít její střední hodnotu.



obr. 15 Schéma potrubní trasy a rozmístění instrumentace

Měřeny jsou teploty v nádobě s chladným médiem, a to ve třech hladinách (T1; T2; T3), teploty na vstupu (T4) a výstupu z topného hadu (T5) a teplotu v zásobníku s horkým médiem (T6). Teploty jsou měřeny platinovými odporovými teploměry (*Jumo Pt500*; *Sensit Pt1000*). Jejichž umístění je částečně demonstrováno na obrázku 10, a schématicky na obrázku 15. K měření průtoku horkého média je použit indukční průtokoměr (*Comac Cal FLOW33*). Sběr dat probíhá pomocí měřicí karty (*DelphinExpertKey 100L*), data jsou ukládána na centrálním uložení v LEMP v intervalech po jedné sekundě. Shrnutí použitých měřících zařízení je uvedeno v následující tabulce 9.

Tabulka 9 - Použitá měřící zařízení

Měřicí zařízení	Označení	Měřené médium
Odporový teploměr Pt500	T1	Chladné médium
Odporový teploměr Pt500	T2	Chladné médium
Odporový teploměr Pt500	T3	Chladné médium
Odporový teploměr Pt500	T4	Horké médium
Odporový teploměr Pt500	T5	Horké médium
Odporový teploměr Pt1000	T6	Horké médium
Indukční průtokoměr Comac Cal FLOW33	Q1	Horký médium

3.4 Měření

V této kapitole je popsán samotný průběh měření. Před zahájením jednotlivých měření je nejprve potřeba ověřit těsnost všech spojů. Těsnost je dosažena řádným utažením všech redukčních prvků k příslušným spojkám, a použitím výrobcem doporučeného těsnění. Těsnost se ověří cirkulací vody v tepelném výměníku. Pokud při použití jednoho těsnění převlečená matice stále prosakuje, přidá se na dosedací plochu ještě jedno těsnění, když při utahování dochází poškození původního těsnění. Dotykem se ověří funkce odporových teploměrů. Nedochází-li k prosakování kapaliny a teploměry fungují, může být nádoba naplněna vodou z vodovodního řádu, a lze zahájit vlastní experiment. Nejprve je zprovozněna topná smyčka spuštěním

elektrokotle a nastavením požadované teploty horkého média v zásobníku. Po dosažení požadované teploty horkého média, je spuštěno čerpadlo napojené k měřicímu okruhu, čímž je zahájeno samotné měření. Zaznamenávány jsou hodnoty teplot udávané teploměry T1, T2, T3, T4 a T5. Hodnotu teploty, jež je třeba během měření kontrolovat, je především teplota horkého média na vstupu do okruhu měřená teploměrem T4. Snahou je udržet tuto teplotu regulací výkonu kotle na přibližně konstantní úrovni. Měření je v optimálním případě ukončeno, dojde-li k prohřátí celé nádrže, tedy pokud teploměry v nádobě s ohřívanou kapalinou měří stejnou teplotu. Při vlastním měření je však brán ohled na provozní dobu laboratoře, a měření je tak přerušeno ve chvíli, kdy je průběh teploty kapaliny přibližně konstantní. Všechna provedená měření jsou uvedena v tabulce 10. Jejich výsledky jsou dále komentovány v následující kapitole.

Tabulka 10 – Všechna provedená měření

Datum	Provedení	Poznámka
19. 3. 2019	Vzorek 1	Zkušební měření
21. 3. 2019	Vzorek 1	Měření 1
25. 3. 2019	Vzorek 2	Měření 2
26. 3. 2019	Vzorek 3	Měření 3
1. 4. 2019	Vzorek 4	Měření 4
2. 4. 2019	Vzorek 4	Reprodukce výsledků

3.5 Naměřená data

V této kapitole jsou prezentovány a komentovány výstupy z jednotlivých měření. Výsledná data jsou po skončení všech měření uspořádána do názorných grafů. Měření jsou teploty chladného média ve všech třech zvolených hladinách, a teploty horkého média na vstupu a výstupu z tepelného výměníku. Časový interval měření (1 sekunda) je, v porovnání s celkovou dobou měření, velmi krátký. Data lze tudíž vykreslit formou spojnicového grafu, kde osa-x udává čas v sekundách, a osa-y udává hodnoty teplot naměřené odpovídajícími teploměry. Průběhy jednotlivých teplot pro každý měřený vzorek jsou vyjádřeny grafy 1÷4. Všechna podstatná naměřená data jsou pak uvedena v tabulkách 12÷15. V kapitole 3.5.5 jsou okomentovány výsledky opakovaného měření pro reprodukci dat, které je provedeno pro jeden ze vzorků. Pro přehlednost je zavedena symbolika uvedená v následující tabulce 11, která je dále používána v grafech a ve výpočtových vztazích ve zbytku diplomové práce.

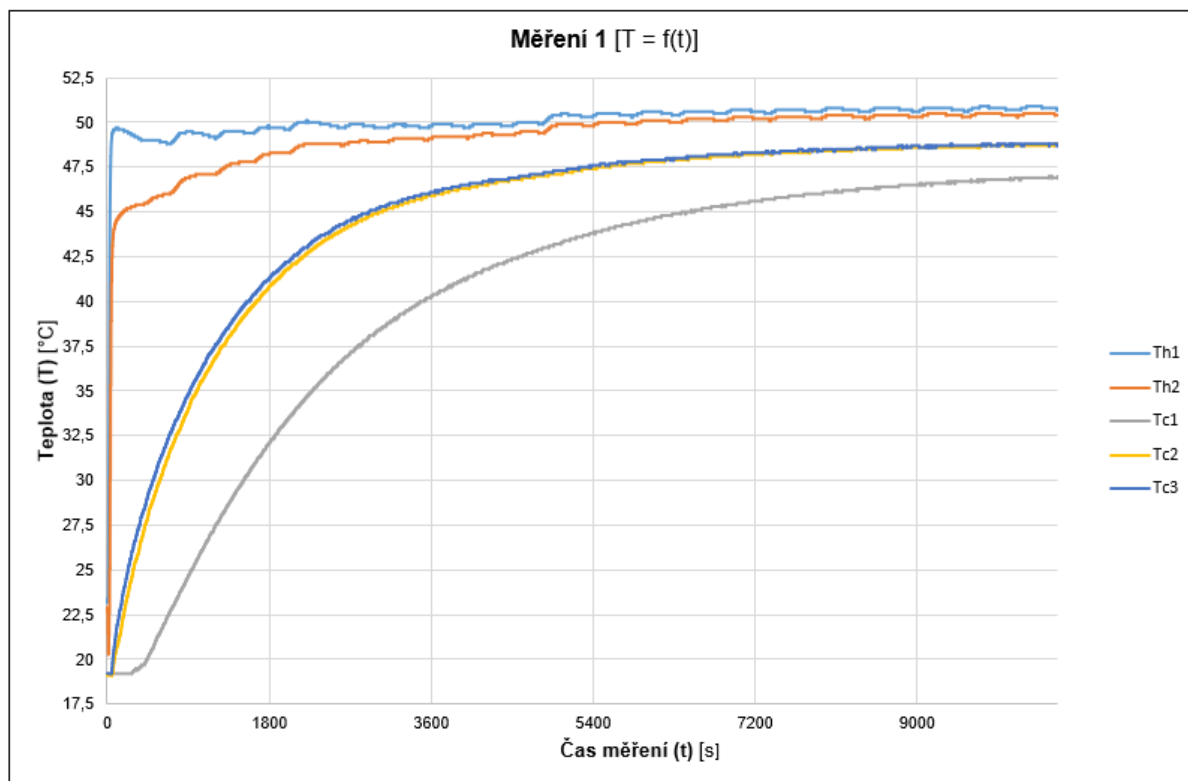
Tabulka 11 – Používaná symbolika

název	Symbol	Veličina
Teplota proudění horkého média na vstupu do výměníku	T_{h1}	$^{\circ}\text{C}$
Teplota proudění horkého média na výstupu z výměníku	T_{h2}	$^{\circ}\text{C}$
Teplota chladného média u dna náplně	T_{c1}	$^{\circ}\text{C}$
Teplota chladného média uprostřed náplně	T_{c2}	$^{\circ}\text{C}$
Teplota chladného média na hladině náplně	T_{c3}	$^{\circ}\text{C}$

Z časových důvodů nedošlo k prohřátí celé nádrže ($T_{c1} < T_{c3}$). Je tak zavedena podmínka ekvivalentního prohřátí nádrže, aby dávalo smysl následné stanovování funkčních závislostí jednotlivých součinitelů přestupu tepla. Ekvivalentní prohřátí nádrže je definováno stavem, jsou-li teploty náplně, měřeny teploměry na hladině a uprostřed, rovny ($T_{c3} = T_{c2}$). Tento stav je zjednodušeně možno označit jako prohřátí poloviny objemu náplně. Čas (t) a celkový tepelný tok (\dot{Q}) potřebný k dosažení výše definovaného stavu bude pro každou měřenou každou konfiguraci rozdílný.

3.5.1 Měření 1

Předmětem tohoto měření je Vzorek 1. Tato konfigurace dává největší teplosměnnou plochu, a tudíž se předpokládá nejvyšší tepelný tok. Průběhy teplot, vyneseny do grafu 1, chladného média v závislosti na čase odpovídají fyzikálním předpokladům uvedených v teoretické části práce. Střední teplotou horkého média (T_H) je uvažován aritmetický průměr všech jejich naměřených hodnot. Je měřen i průtok horkého média pro stanovení Reynoldsova čísla.



Graf 1 – Teplotní charakteristiky (vzorek 1)

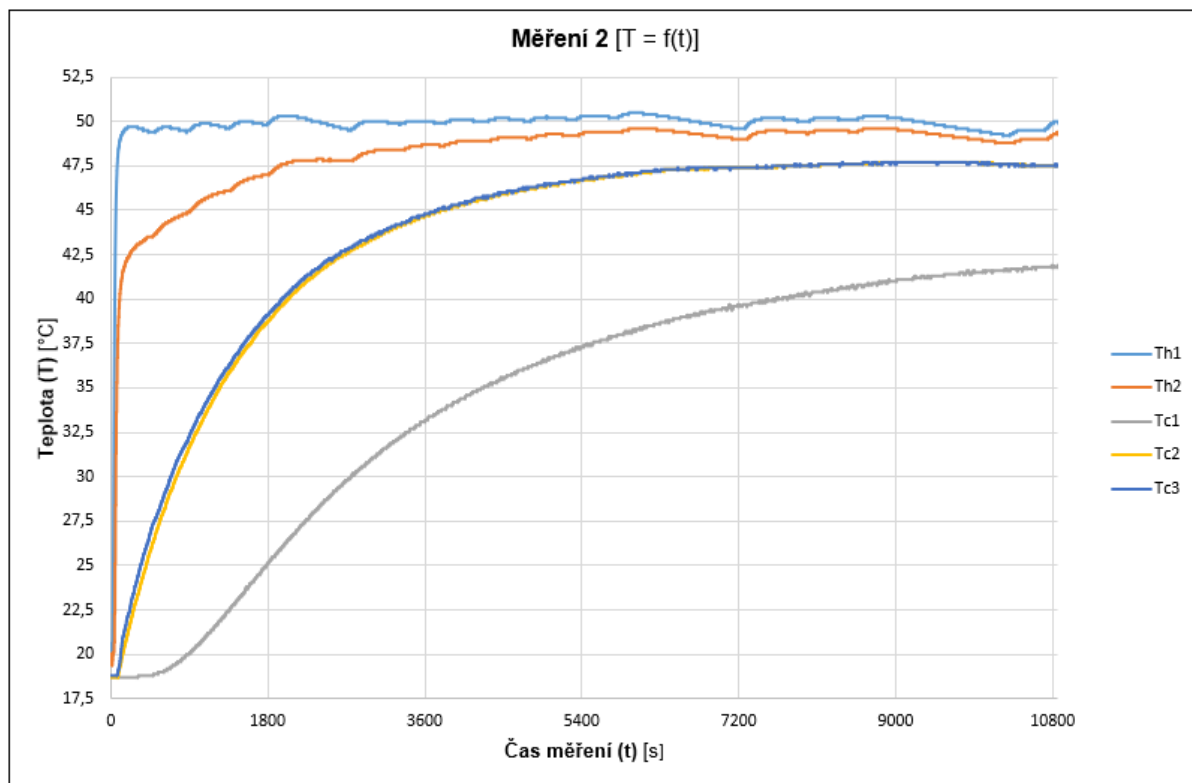
Měření trvalo přibližně 3 hodiny, během nichž nedošlo k prohřátí celého objemu kapaliny v nádrži. K prohřátí poloviny objemu kapaliny, tak jak bylo definováno výše, dojde přibližně za 3670 sekund.

Tabulka 12 – Naměřená data (vzorek 1)

Vzorek 1		
Jmenovitá světlost (DN)	15	mm
Celková délka (L)	5000	mm
Datum měření	21. 3. 2019	
Zahájení měření	11:43	
Ukončení měření	14:39	
Celkový čas (t_c) měření	10 560	s
Objemový průtok (Q_V)	0,36	l·s ⁻¹
Střední teplota (T_{H1}) horkého média	50,13	°C
čas (t) prohřátí ekvivalentního objemu	3 670	s

3.5.2 Měření 2

Vzorek 2, jenž je předmětem tohoto měření, dává menší teplosměnnou plochu, a tudíž menší tepelný tok než předchozí vzorek. Provedení šroubovice je totožné. Předpokládané hydrodynamické poměry v náplni tak budou podobné. Největším rozdílem je míra prohřátí náplně u dna, která je udávána teplotou (T_{c1}). Vysvětlením je právě menší tepelný tok.



Graf 2 – Teplotní charakteristiky (vzorek 2)

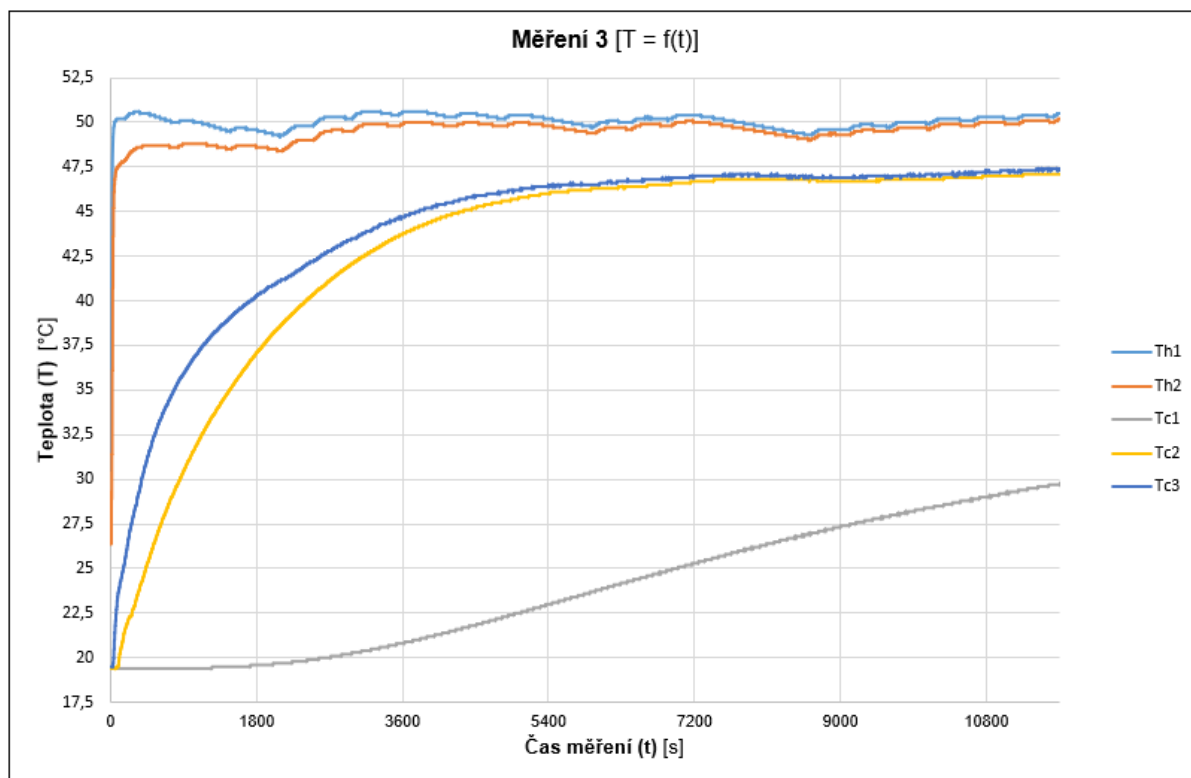
Měření trvalo přibližně 3 hodiny, během nichž nedošlo k prohřátí celého objemu kapaliny v nádrži. K prohřátí poloviny objemu náplně dojde opět přibližně za 3670 sekund.

Tabulka 13 – Naměřená data (vzorek 2)

Vzorek 2		
Jmenovitá světlost (DN)	12	mm
Celková délka (L)	5000	mm
Datum měření	25. 3. 2019	
Zahájení měření	11:25	
Ukončení měření	14:26	
Celkový čas (t_c) měření	10 860	s
Objemový průtok (Q_v)	0,18	$l \cdot s^{-1}$
Střední teplota (T_{H1}) horkého média	49,83	°C
čas (t) prohřátí ekvivalentního objemu	3 670	s

3.5.3 Měření 3

Vzorek 3 je kratší než předchozí dva vzorky. Je tedy svinut do šroubovice s jiným (vyšším) stoupáním. Oproti předchozím měřením tak dojde, ke změně hydrodynamických poměrů, což se projeví pomalejším prohříváním nádrže s výrazným rozdílem průběhu teploty naměřené u dna. Tento efekt je dále diskutován v kapitole 4.3, kde je zaveden charakteristický rozměr beroucí v potaz různé stoupání šroubovice. Během měření došlo k nejvýraznějšímu poklesu teploty (T_{H1}), což se negativně projevilo na průběhu teplot chladné náplně.



Graf 3 – Teplotní charakteristiky (vzorek 3)

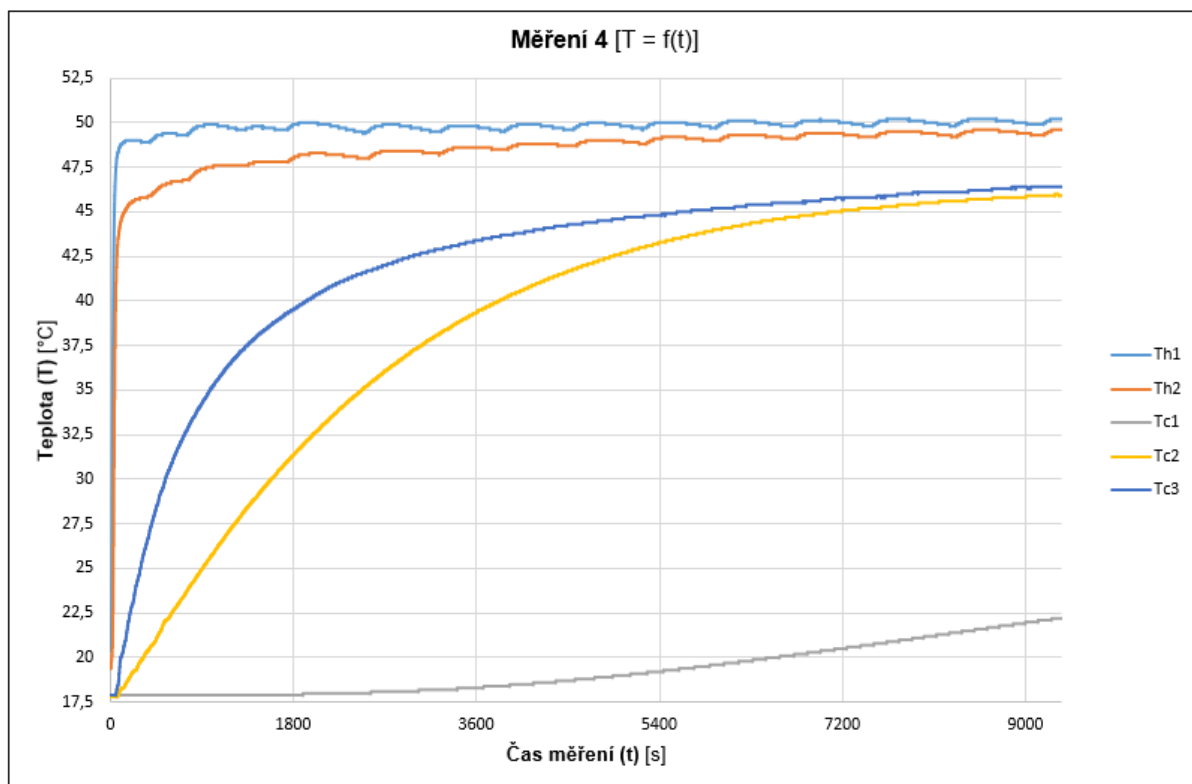
Měření trvalo přes 3 hodiny, během nichž nedošlo k prohřátí celého objemu kapaliny v nádrži. Čas prohřátí poloviny objemu náplně byl stanoven na 6000 sekund.

Tabulka 14 – Naměřená data (vzorek 3)

Vzorek 3		
Jmenovitá světlost (DN)	15	mm
Celková délka (L)	3000	mm
Datum měření	26. 3. 2019	
Zahájení měření	11:20	
Ukončení měření	14:35	
Celkový čas (t_c) měření	11 700	s
Objemový průtok (Q_v)	0,43	l·s ⁻¹
Střední teplota (T_{H1}) horkého média	50,06	°C
čas (t) prohřátí ekvivalentního objemu	6 000	s

3.5.4 Měření 4

Vzorek 4 je svinut do šroubovice o stejném stoupání jako ten předchozí. Vzhledem k nejmenšímu teplosměnnému povrchu je prohřívání náplně nejpomalejší. Ze všech měřených vzorků je zde nejmarkantnější rozdíl teplot chladné kapaliny na hladině (T_{c3}) a uprostřed náplně (T_{c2}). Čas, za který dojde k prohřátí náplně, je výrazně delší než v předchozích případech. Průběh teploty (T_{c1}) chladné náplně u dna má podobný průběh jako v případě měřeného vzorku 3, z čehož lze vyvodit že oproti měření 3 se hydrodynamické poměry v náplni příliš nezměnily.



Graf 4 – Teplotní charakteristiky (vzorek 4)

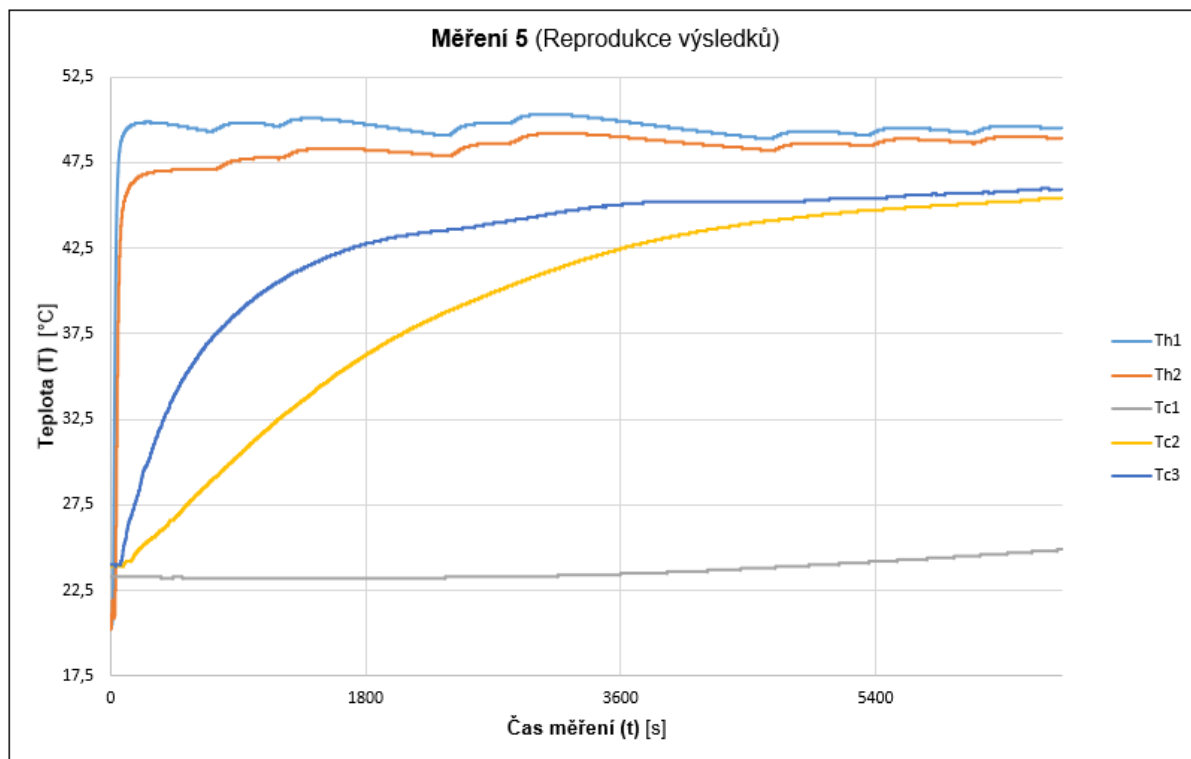
Měření trvalo necelé 3 hodiny, během nichž nedošlo k prohřátí celého objemu kapaliny v nádrži. Čas prohřátí poloviny objemu náplně byl stanoven na 9400 sekund.

Tabulka 15 – Naměřená data (vzorek 4)

Vzorek 4		
Jmenovitá světlost (DN)	12	mm
Celková délka (L)	3000	mm
Datum měření	1. 4. 2019	
Zahájení měření	14:44	
Ukončení měření	17:20	
Celkový čas (t_c) měření	9 360	s
Objemový průtok (Q_V)	0,23	$l \cdot s^{-1}$
Střední teplota (T_{H1}) horkého média	49,74	°C
čas (t) prohřátí ekvivalentního objemu	9 400	s

3.5.5 Ostatní měření

Účelem reprodukce výsledků je potvrdit opakovatelnost měření. Jeden z měřených vzorků by tak měl být přeměřen za totožných podmínek. Přeměřeno tak bylo měření 4. Výsledky opakovaného měření jsou zaneseny do grafu 5.

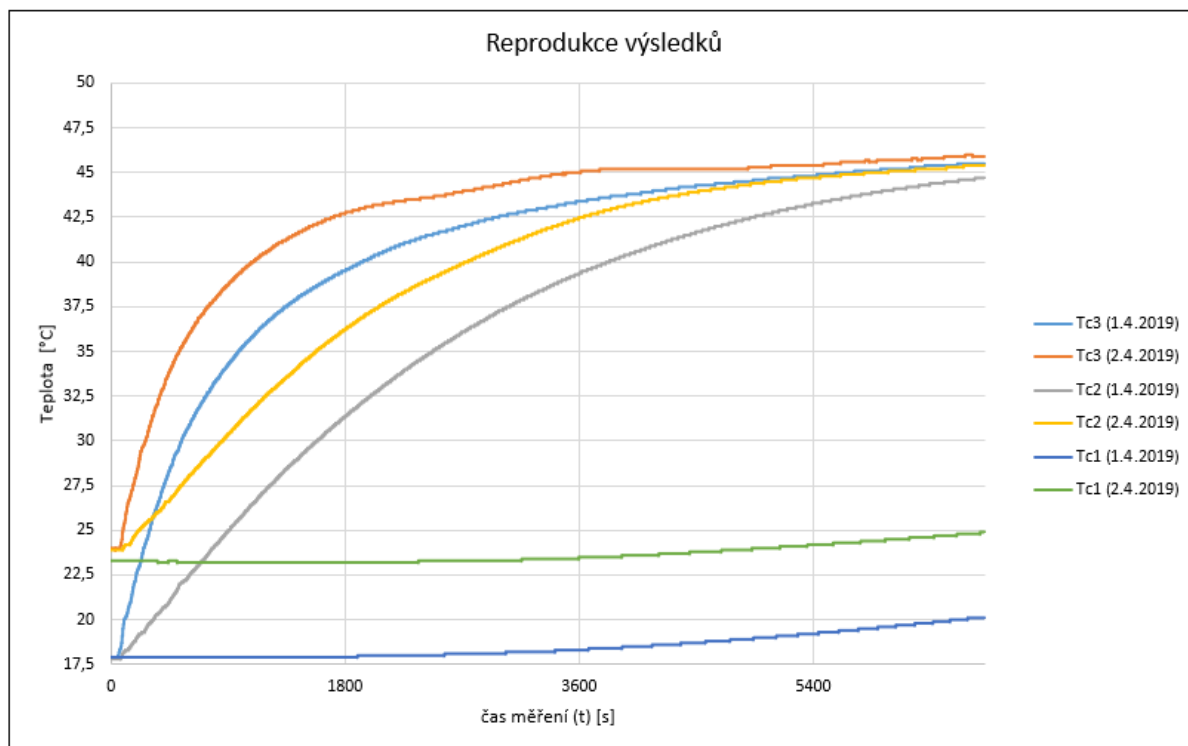


Graf 5 – Teplotní charakteristiky – opakované měření (vzorek 4)

Vzhledem k časové vyčerpání LENP nedošlo při opakovaném měření k výměně chladné náplně. Následkem čehož se mírně změnily vstupní podmínky, jelikož kapalina v nádobě přes noc neprochladla na hodnotu počáteční teploty předchozího měření. Z toho důvodu nejsou příliš zajímavé konkrétní naměřené hodnoty, ale spíše průběhy jednotlivých teplot, tedy zdali zůstaly zachovány hydrodynamické poměry. Porovnání průběhů naměřených teplot z Měření 4 a 5 vyjadřuje graf 6 na další stránce.

Tabulka 16 – Naměřená data konfigurace 4 (opakované měření)

Měření 5 (reprodukce výsledků)		
Jmenovitá světlost (DN)	12	mm
Celková délka (L)	3000	mm
Datum měření	2. 4. 2019	
Zahájení měření	11:45	
Ukončení měření	13:37	
Celkový čas (t) měření	6 720	s
Objemový průtok (Q_V)	0,23	$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$
Střední teplota ($\overline{T_{H1}}$) horkého média	49,45	$^{\circ}\text{C}$



Graf 6 – Porovnání teplotních charakteristik měření vzorku 4

Z grafu lze vyvodit, že vzhledem k totožným hydrodynamickým podmínkám, jsou průběhy jednotlivých odpovídajících teplot velmi podobné, až do bodu, kdy se začnou projevovat tepelné ztráty do okolí. Lze také vyvodit, že dochází k mírně rychlejšímu ohřevu u měření 4 (1.4.2019), z důvodu vyššího tepelného toku daného větším teplotním spádem.

4 Analýza naměřených dat

Cílem analýzy dat, popisované v této kapitole, je nalézt praktický vztah pro obecné odvození součinitele přestupu tepla. Byla provedena čtyři měření, z nichž se dle výpočtových vztahů, uvedených v teoretickém úvodu, vyjádří vhodné fyzikální funkční závislosti pomocí bezrozměrné analýzy. Konfigurace experimentálního tepelného výměníku je specifická tím, že na každé z jeho stran dochází k jinému režimu šíření tepla konvekcí, v chladné statické nádrži dochází k volné konvekci, zatímco v topném hadu k nucené konvekci. Jak již bylo stanoveno v kapitole 2.2.1, lze tak snadno odvodit součinitel přestupu tepla na straně chladného média, za předpokladu, že bude výrazně menší než součinitel přestupu tepla na straně horkého média (předpoklad je ověřován výpočtem). Samotný součinitel přestupu tepla je funkcí mnoha proměnných, které zohledňují hydrodynamické poměry na horké i chladné straně výměníku a fyzikální vlastnosti jednotlivých médií. Všechny tyto parametry jsou vyjádřeny ve formě bezrozměrných vztahů, jejichž vzájemnou relaci udávají kritériální rovnice. Bezrozměrná čísla vystupující v této rovnici vyjadřují zmíněnou hledanou fyzikální funkční závislost. Posledním krokem, popsáním v této kapitole, je hledání křivky vystihující hledanou funkční závislost vhodnou aproximační metodou. Použita je aproximace metodou nejmenších čtverců. Jednotlivé kroky jsou podrobně popsány v pořadí, v němž byly řešeny. K řešení úlohy je zapotřebí znát konkrétní hodnoty veličin, které jsou funkcí teploty. Jejich stanovení je provedeno dle fyzikálních tabulek uvedených v tabulce 16.

Tabulka 17 – Používané fyzikální tabulky

Veličina	Zdroj
Hustota (ρ)	[13]
Měrná tepelná kapacita (c_p) (za konstantního tlaku)	[14]
Dynamická viskozita (η)	[15]
Tepelná vodivost (λ)	[16]
Součinitel objemové roztažnosti (β)	[16]

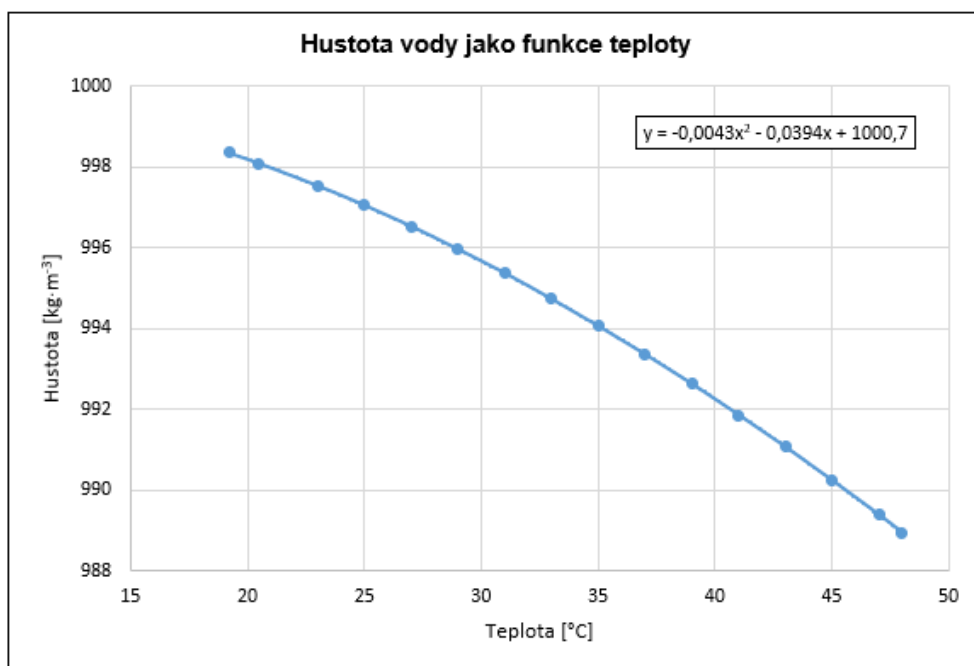
4.1 Volná konvekce

Volná konvekce je režim šíření tepla, vyznačující se pohybem molekul kapaliny pouze vlivem rozdílných teplot (hustot) jednotlivých molekul. Tedy jedná-li se o kapalinu statickou. Ve výpočtových vztazích je však hustota (a další fyzikální veličiny), jež je funkcí teploty kapaliny, dosazována jako konstanta. Stanovovány tak jsou střední hodnoty příslušných veličin dle výpočtových vztahů (rovnice 22 a 23). Se středními hodnotami se dále může pracovat jako s konstantami. Hodnoty hustoty pro konkrétní teploty chladného média jsou vyneseny ve grafu 7 a jsou proloženy spojnici trendu. Střední hmotnost kapaliny je pak stanovena numerickou integrací funkce spojnice trendu této charakteristiky v softwaru MAPLE [17]. Obdobným způsobem je získána i střední měrná tepelná kapacita vody.

$$\bar{m} = \frac{V \cdot \int_{T_{c0}}^{T_{cf}} \rho}{(T_{cf} - T_{c0})} \quad (22)$$

$$\bar{c}_p = \frac{\int_{T_{c0}}^{T_{cf}} c_p}{(T_{cf} - T_{c0})} \quad (23)$$

\bar{m}	[kg]	střední hmotnost kapaliny
\bar{c}_p	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	střední tepelná kapacita kapaliny (za konstantního tlaku)
V	[m ³]	objem kapaliny
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota kapaliny
T_{c0}	[°C]	počáteční teplota kapaliny v nádrži
T_{cf}	[°C]	teplota prohřátí kapaliny v nádrži



Graf 7 – Hustota vody jako funkce teploty

K šíření tepla volnou konvekcí dochází ve statické náplni nádoby. V kapitole 2.2.2 byl odvozen následující výpočtový vztah doby ohřevu náplně daný rovnicí 24:

$$t = \frac{\bar{m} \cdot \bar{c}_p}{U \cdot A} \cdot \ln \left(\frac{\bar{T}_{H1} - T_{c0}}{\bar{T}_{H1} - T_{cf}} \right) \quad (24)$$

t	[s]	čas prohřátí
\bar{m}	[kg]	střední hmotnost kapaliny v nádrži
\bar{c}_p	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	střední tepelná kapacita (za stálého tlaku) kapaliny v nádrži
U	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	součinitel prostupu tepla
A	[m ²]	vnější povrch flexibilního prvku (teplosměnný povrch)
\bar{T}_{H1}	[°C]	střední teplota horké (proudící) kapaliny
T_{c0}	[°C]	počáteční teplota kapaliny v nádrži
T_{cf}	[°C]	teplota prohřátí kapaliny v nádrži

Všechny proměnné vystupující v rovnici jsou známy. Časem prohřátí (**t**), jenž byl definován v kapitole 3.5, je myšlena doba, za kterou dojde k prohřátí poloviny objemu náplně, tedy platí-li, že (**T_{c3} = T_{c2}**). Teplosměnnou plochou je celkový vnější povrch trubek, přičemž místa kontaktů s podpůrnými konzolami jsou zanedbána. Konkrétní hodnoty času prohřátí (**t**) byly voleny po konzultaci s vedoucím práce a jsou uvedeny v tabulkách 12÷15. V následujících tabulkách 18÷21 jsou dále uvedeny hodnoty všech veličin, které vystupují v následujících rovnicích 25 a 26:

$$U = \frac{\bar{m} \cdot \bar{c}_p}{t \cdot A} \cdot \ln \left(\frac{\bar{T}_{H1} - T_{c0}}{\bar{T}_{H1} - T_{cf}} \right) \quad (25)$$

$$\dot{Q} = \frac{\bar{m} \cdot \bar{c}_p \cdot (T_{cf} - T_{c0})}{t} \quad (26)$$

Rovnicí 26 se ověří, že vzorek s největší plochou výměny tepla má nejvyšší tepelný tok (**\dot{Q}**), tedy že příslušný vzorek prohřívá odpovídající množství kapaliny na nejvyšší teplotu. Spočtené hodnoty tepelných toků, uvedené v tabulce 22 na následující stránce, odpovídají tomuto předpokladu. Dále je vyjádřen součinitel prostupu tepla (**U**), který je definován jako konstanta úměrnosti šíření tepla z horkého média přes stěnu do chladného média. Je-li tloušťka stěny malá (tloušťka stěny vlnovkové trubky je 0,3 mm) lze uvažovat, že menší ze součinitelů přestupu tepla (**α**) bude přibližně odpovídat hodnotě součinitele prostupu tepla (**U**), tak jak bylo odvozeno v kapitole 2.2.1.

$$U \approx \min(\alpha)$$

Předpokládána je řádově vyšší hodnota součinitele přestupu tepla na straně horkého proudícího média. Zdali tomu tak je i ve skutečnosti je ověřováno v kapitole 4.2.

Následující tabulky 18÷21 obsahují všechna vstupní (naměřená) data. Výsledkem výpočtu dle rovnice 25 je hodnota součinitele prostupu tepla, jenž by měl být přibližně rovný hodnotě součinitele přestupu tepla. Je-li splněn výše uvedený teoretický předpoklad, jsou hodnoty součinitele prostupu tepla (**U**), zvýrazněny červenou barvou v následujících tabulkách, považovány za součinitel přestupu tepla na straně chladné náplně, a používány se tak v bezrozměrné analýze ke stanovení obecného funkčního vztahu v kapitole 4.4.

Tabulka 18 – Součinitel prostupu tepla (vzorek 1)

Vzorek 1	symbol	hodnota	jednotka
Délka flexibilního prvku	L	5	m
Jmenovitý průměr flexibilního prvku	DN	0,015	m
Střední hmotnost kapaliny	\bar{m}	79,566	kg
Střední měrná tepelná kapacita	\bar{c}_p	4179	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Plocha výměny tepla	A	0,394	m ²
Čas prohřátí	T	3670	°C
Střední teplota proudění	\overline{T}_{h1}	49,4	°C
Počáteční teplota ohřivaného média	T _{c0}	19,2	°C
Teplota prohřátého média	T _{cf}	46,1	°C
Součinitel prostupu tepla	U	511,815	W·m ⁻² ·K ⁻¹

Tabulka 19 – Součinitel prostupu tepla (vzorek 2)

Vzorek 2	symbol	hodnota	jednotka
Délka flexibilního prvku	L	5	m
Jmenovitý průměr flexibilního prvku	DN	0,012	m
Střední hmotnost	\bar{m}	79,587	kg
Střední měrná tepelná kapacita	\bar{c}_p	4179	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Plocha výměny tepla	A	0,302	m ²
Čas prohřátí	T	3670	°C
Střední teplota proudění	\overline{T}_{h1}	49,5	°C
Počáteční teplota ohřivaného média	T _{c0}	18,8	°C
Teplota prohřátého média	T _{cf}	44,8	°C
Součinitel prostupu tepla	U	567,601	W·m ⁻² ·K ⁻¹

Tabulka 20 – Součinitel prostupu tepla (vzorek 3)

Vzorek 3	symbol	hodnota	jednotka
Délka flexibilního prvku	L	3	m
Jmenovitý průměr flexibilního prvku	DN	0,015	m
Střední hmotnost	\bar{m}	79,576	kg
Střední měrná tepelná kapacita	\bar{c}_p	4179	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Plocha výměny tepla	A	0,236	m ²
Čas prohřátí	T	6000	°C
Střední teplota proudění	\bar{T}_{h1}	50,1	°C
Počáteční teplota ohřívaného média	T _{c0}	17,9	°C
Teplota prohřátého média	T _{cf}	46,4	°C
Součinitel prostupu tepla	U	512,596	W·m ⁻² ·K ⁻¹

Tabulka 21 – Součinitel prostupu tepla (vzorek 4)

Vzorek 4	symbol	hodnota	jednotka
Délka flexibilního prvku	L	3	m
Jmenovitý průměr flexibilního prvku	DN	0,012	m
Střední hmotnost	\bar{m}	79,56	kg
Střední měrná tepelná kapacita	\bar{c}_p	4179	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Plocha výměny tepla	A	0,181	m ²
Čas prohřátí	T	9400	°C
Střední teplota proudění	\bar{T}_{h1}	49,75	°C
Počáteční teplota ohřívaného média	T _{c0}	19,4	°C
Teplota prohřátého média	T _{cf}	46,3	°C
Součinitel prostupu tepla	U	430,276	W·m ⁻² ·K ⁻¹

V tabulce 22 jsou vypsána teoreticky spočítaná množství přenesené tepelné energie s využitím hodnot součinitele přestupu tepla (**U**) spočteného výše. Tepelné toky podle očekávání stoupají s rostoucí teplosměnnou plochou. Hustoty tepelného toku se liší, což je zřejmě způsobeno rozdílným uspořádáním šroubovice, či vlivem zjednodušení při volbě ekvivalentních podmínek měření.

Tabulka 22 – Předané teplo

Vzorek	Celkové předané teplo	Tepelné tok	Hustota tepelného toku
	kJ	kW	kW·m ⁻²
Vzorek 1	8946,56	2,438	6,219
Vzorek 2	8649,515	2,357	7,856
Vzorek 3	9479,88	1,580	6,752
Vzorek 4	8945,886	0,952	5,317

4.2 Nucená konvekce

K šíření tepla nucenou konvekci dochází v topném hadu, kterým je čerpadlem cirkulována horká kapalina. V této kapitole bude stanoven součinitel přestupu tepla na straně proudící kapaliny pro jedno z měření, tak aby byl ověřen předpoklad zavedený v teoretické části práce, týkající se relace součinitelů přestupu tepla na obou stranách výměníku. Odvození součinitele na straně horkého média je provedeno pomocí bezrozměrné analýzy pro přestup tepla nucenou konvekci. Použité bezrozměrné podobnostní vztahy, blíže byly popsány v kapitole 2.1.3, jsou Reynoldsovo, Prandltovo a Nusseltovo číslo – rovnice 27÷29:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\eta} \quad (27)$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} \quad (28)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (29)$$

Součinitel přestupu tepla je pak vyjádřen z kritériální rovnice (rovnice 30) stanovené pro nucenou konvekci s turbulentním režimem proudění:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (30)$$

Jedná se o běžný způsob vyjadřování součinitelů přestupu tepla v praxi. Hodnoty dosazované do výše uvedených rovnic jsou uvedeny v tabulce 23. Jedná se o fyzikální vlastnosti vody při uvažované teplotě. Vzhledem k teplotním fluktuacím je touto teplotou myšlen aritmetický průměr naměřených hodnot teploty horkého média za čas (t) zavedený v předchozí kapitole.

Tabulka 23 – Vstupní data – volná konvekce (vzorek 1)

Vzorek 1	Symbol	hodnota	jednotka
Střední teplota proudění kapaliny	\overline{T}_H	49,4	°C
Charakteristický rozměr	L	0,0157	m
Hustota	P	988,33	kg·m ⁻³
Dynamická viskozita	η	0,553·10⁻³	kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹
Tepelná vodivost	λ	0,643	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Měrná tepelná kapacita	c _p	4181	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹

Charakteristickým rozměrem je zvolen vnitřní průměr trubky (**ID**) z tabulky 1 pro příslušné DN. Rychlost proudění (**u**) se vypočítá z rovnice 31 (rovnice kontinuity), kde objemový průtok (**Q_v**) je průtok horkého média naměřený průtokoměrem při měření odpovídajícího vzorku, viz tabulka 12. Hodnota průtoku je dosazována do rovnice 31 po převedení z jednotky [l·s⁻¹] na jednotku [m³·s⁻¹]. Průtočným průřezem (**S**) myšlen nejmenší průřez trubky.

$$u = \frac{Q_v}{S} \quad (31)$$

Tabulka 24 – Součinitel přestupu tepla – volná konvekce (vzorek 1)

	Symbol	hodnota	jednotka
Reynoldsovo číslo	Re	54613,273	-
Prandtlovo číslo	Pr	3,595	-
Nusseltovo číslo	Nu	236,506	-
Součinitel přestupu tepla	A	10138,233	W·m ⁻² ·K ⁻¹

Z tabulky 24 je zřejmé, že součinitel přestupu tepla na straně horkého média dosahuje hodnoty 10138,233 [W·m⁻²·K⁻¹], a je tak výrazně vyšší než součinitel prostupu tepla zjištěný experimentálně (viz tabulka 18). Předpoklad je tudíž potvrzen a k určení bezrozměrných čísel jsou dále používány hodnoty součinitelů prostupu tepla vypočteny v kapitole 4.1, se kterými se dále pracuje jako s hodnotami součinitelů přestupu tepla na straně chladného média.

4.3 Určení bezrozměrných čísel

V předchozích krocích byly z naměřených dat výpočtem stanoveny součinitele přestupu tepla pro šíření tepla volnou konvekcí na straně chladné náplně pro každý z měřených vzorků. Posledním krokem ke stanovení hledané funkční závislosti je bezrozměrná analýza chladné strany výměníku tepla – chladné statické náplně. Hnací silou pohybu kapaliny není v tomto případě setrvačná síla, ale vztlková síla vyvolaná rozdílnou hmotností molekul vody o různé teplotě. Tudíž je třeba namísto Reynoldsova čísla zavést jiné bezrozměrné podobnostní kritérium, které zohledňuje danou hnací sílu. Tímto kritériem podobnosti je Grasshofovo kritérium (**Gr**) vyjádřené následující rovnicí 32:

$$Gr = \frac{L^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\eta^2} \quad (32)$$

L	[m]	charakteristický rozměr
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota kapaliny
g	[m·s ⁻²]	gravitační zrychlení
β	[K ⁻¹]	součinitel objemové roztažnosti
ΔT	[K]	rozdíl teplot
η	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]	dynamická viskozita

Postup bezrozměrné analýzy je pak obdobný jako v kapitole 4.2 pouze s tím rozdílem, že je nutné si navíc definovat některé ze vstupních proměnných. Ve statické chladné náplni dochází k lokální změně teploty média. Je třeba si tedy určit konkrétní teplotu, pro kterou se stanovují hodnoty veličin závislých na teplotě. Tyto hodnoty jsou dále považovány za konstanty a mohou být dosazovány do bezrozměrných vztahů. Teplota, pro kterou jsou stanovovány tyto hodnoty, je střední teplota prohřátí (T_s) náplně určená dle vztahu 33. Hodnoty teplot chladného média dosazované do tohoto vztahu byly definovány v kapitole 3.5 a pro každý řešený případ jsou vypsány v tabulkách 18÷21.

$$T_s = \frac{1}{2} \cdot (T_{cf} - T_{c0}) \quad (33)$$

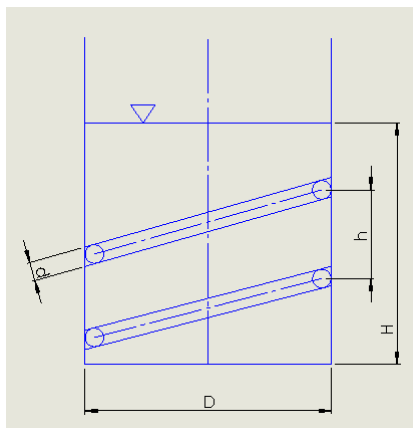
Teplotní spád (ΔT) v čitateli Grasshofova čísla je rozdíl mezi teplotou stěny a teplotou stěnou neovlivněné oblasti:

$$\Delta T = T_w - T_s \quad (34)$$

T_w	[K]	Teplota stěny
T_s	[K]	Střední teplota chladné statické náplně

Vzhledem k vysoké hodnotě součinitele přestupu tepla na straně horkého procesního proudu a malé tloušťce stěny, lze uvažovat, že teplota stěny (T_w) bude odpovídat teplotě horkého média, kdy opět bude uvažován její aritmetický průměr. Teplotou stěnou neovlivněné oblasti je volena hodnota střední teploty (T_s) chladného média definována rovnicí 33.

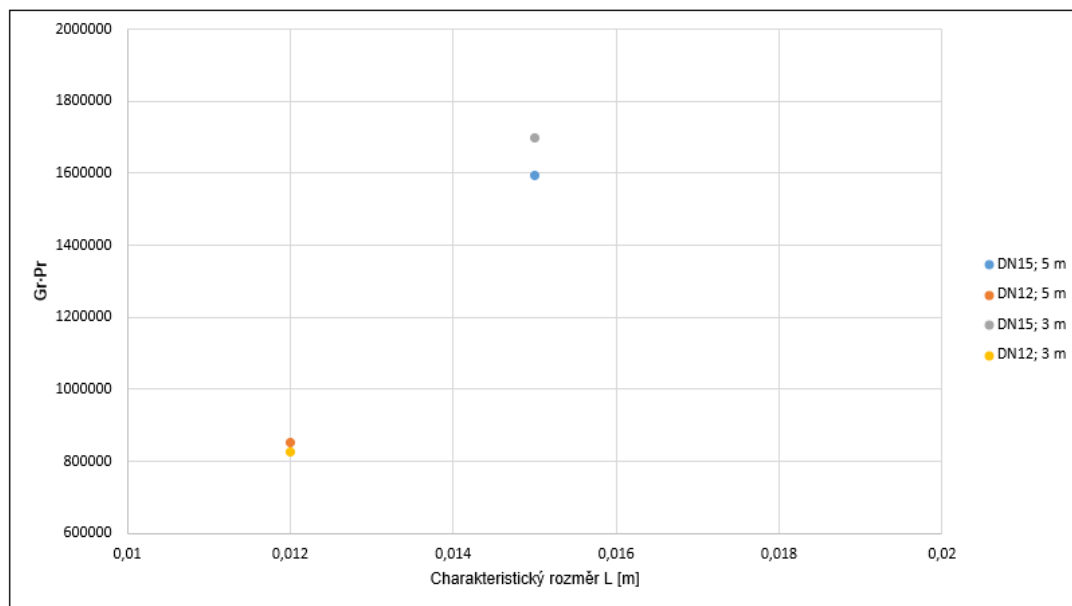
Charakteristický rozměr (L) v Grasshofově kritériu pro volnou konvekci popisuje rozměr povrchu ve směru přirozeného pohybu kapaliny, tedy průměr pro horizontálně uložená válcová tělesa a výšku pro vertikálně uložená tělesa.[10] Řešený tepelný výměník je nekonvenčního uspořádání, a tak je třeba zvážit konkrétní podobu charakteristického rozměru dosazovaného do podobnostních vztahů. Charakteristický rozměr je vyjádřen v délkových jednotkách tak, aby byla zachována bezrozměrnost podobnostních čísel. Možné podoby charakteristického rozměru jsou konzultovány s vedoucím práce. Na obrázku 16 je znázorněn příčný průřez uspořádání topného hadu v nádobě



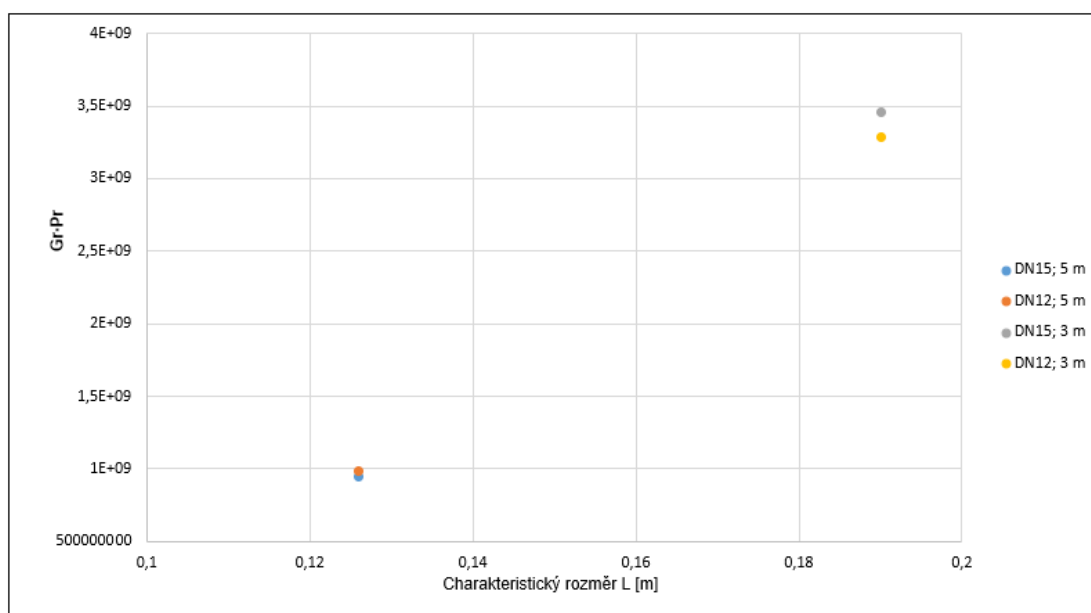
Obr. 16 – Příčný průřez uspořádání topného hadu v nádobě

Z tohoto konstrukčního provedení jsou stanoveny rozměry, kterými lze parametricky popsat uspořádání topného hadu v nádobě.

Charakteristický rozměr by měl především vyjadřovat určitou fyzikální závislost mezi bezrozměrnými koeficienty. Z grafu 8 lze vidět, je-li charakteristický rozměr definován jako vnější průměr trubky (**d**), či výškou šroubovice (**h**), tak jak vyjadřuje graf 9, že nedojde k dostatečné korelaci všech 4 měřených vzorků (spojnicí trendu budou přímky). Z toho důvodu je charakteristický rozměr definován alespoň dvěma proměnnými.



Graf 8 – Charakteristický rozměr 3 (průměr topného hadu)



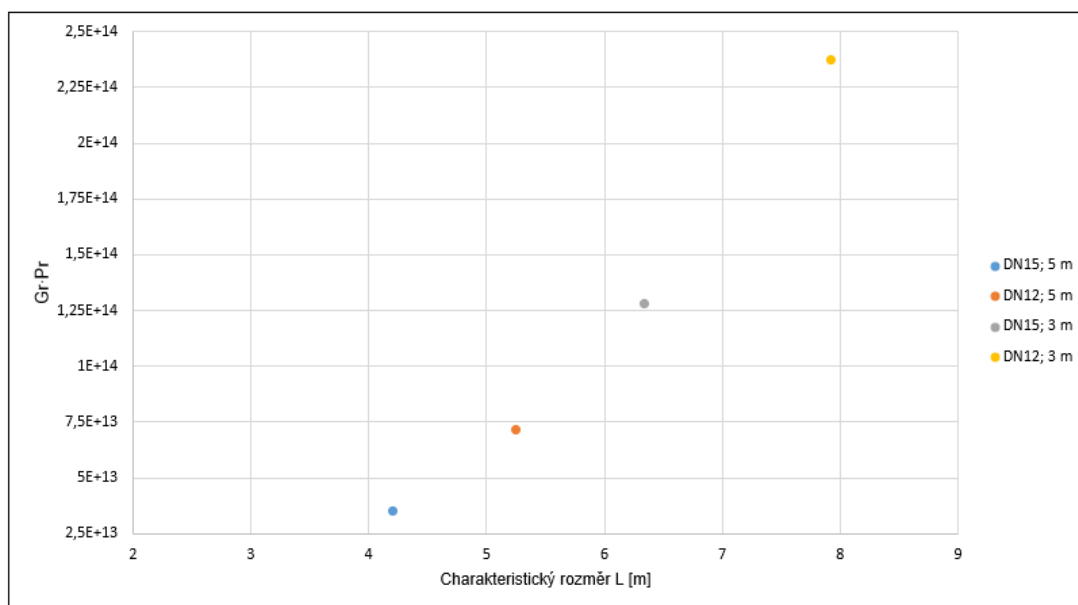
Graf 9 – Charakteristický rozměr 2 (výška stoupání šroubovice)

Po konzultaci s vedoucím diplomové práce je zaveden vztah, daný rovnicí 35, který zahrnuje oba parametry jednotlivých flexibilních prvků.

$$L = \frac{h \cdot D_h}{d} \quad (35)$$

h	[m]	výška stoupání šroubovice
D_h	[m]	průměr šroubovice
d	[m]	vnější průměr trubky

Bezrozměrnost Grasshofova čísla je zajištěna přítomností dalšího jednotkového rozměru ve výše uvedeném vztahu. Tím je zvolen průměr nádrže s chladnou náplní. Po dosažení charakteristického rozměru do příslušných bezrozměrných parametrů je získána funkční závislost, která je znázorněna na grafu 10, kde lze již pozorovat jistou funkční závislost mezi všemi měřenými vzorky.



Graf 10 – Charakteristický rozměr 3 (zahrnutý oba parametry)

Vypočtené charakteristické rozměry jsou pak pro přehlednost vypsány následující v tabulce:

Tabulka 25 – Zvolené charakteristické rozměry

			Charakteristický rozměr L
			m
Měření 1	DN15	5 m	4,2
Měření 2	DN12	5 m	5,25
Měření 3	DN15	3 m	6,333
Měření 4	DN12	3 m	7,917

V následujících tabulkách 26÷29 jsou uvedeny všechny vstupní parametry a výsledky provedených výpočtů. Vypočítané bezrozměrné koeficienty se pak v následující kapitole použijí ke stanovení obecné hledané funkční závislosti.

Tabulka 26 – Výpočet bezrozměrných koeficientů (vzorek 1)

Měření 1	Symbol	hodnota	Jednotka
Střední teplota v nádobě	t_s	32,65	°C
Hustota	ρ	994	kg·m ⁻³
Dynamická viskozita	η	$0,7545 \cdot 10^{-3}$	kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹
Tepelná vodivost	λ	0,623	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Měrná tepelná kapacita	c_p	4180	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Gravitační zrychlení	G	9,81	m·s ⁻²
Součinitel objemové roztažnosti	β	$0,327 \cdot 10^{-3}$	K ⁻¹
Rozdíl teplot	ΔT	16,75	°C
Nusseltovo číslo	Nu	3450,442	-
Prandtlovo číslo	Pr	5,062	-
Grasshofovo číslo	Gr	$6,921 \cdot 10^{-12}$	-
Rayleighovo číslo	(Pr · Gr)	$3,503 \cdot 10^{-13}$	-

Tabulka 27 – Výpočet bezrozměrných koeficientů (vzorek 2)

Měření 2	Symbol	hodnota	jednotka
Střední teplota v nádobě	t_s	31,8	°C
Hustota	ρ	995,12	kg·m ⁻³
Dynamická viskozita	η	$0,768 \cdot 10^{-3}$	kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹
Tepelná vodivost	λ	0,622	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Měrná tepelná kapacita	c_p	4180	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Gravitační zrychlení	G	9,81	m·s ⁻²
Součinitel objemové roztažnosti	β	$0,328 \cdot 10^{-3}$	K ⁻¹
Rozdíl teplot	ΔT	17,69	°C
Nusseltovo číslo	Nu	4790,846	-
Prandtlovo číslo	Pr	5,159	-
Grasshofovo číslo	Gr	$1,384 \cdot 10^{-13}$	-
Rayleighovo číslo	(Pr · Gr)	$7,1399 \cdot 10^{-13}$	-

Tabulka 28 – Výpočet bezrozměrných koeficientů (vzorek 3)

Měření 3	symbol	hodnota	jednotka
Střední teplota v nádobě	t_s	32,15	°C
Hustota	ρ	995	kg·m ⁻³
Dynamická viskozita	η	$0,7622 \cdot 10^{-3}$	kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹
Tepelná vodivost	λ	0,622	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Měrná tepelná kapacita	c_p	4180	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Gravitační zrychlení	g	9,81	m·s ⁻²
Součinitel objemové roztažnosti	β	$0,3275 \cdot 10^{-3}$	K ⁻¹
Rozdíl teplot	ΔT	17,95	°C
Nusseltovo číslo	Nu	5219,357	-
Prandtlovo číslo	Pr	5,122	-
Grasshofovo číslo	Gr	$2,497 \cdot 10^{-13}$	-
Rayleighovo číslo	(Pr · Gr)	$1,279 \cdot 10^{-14}$	-

Tabulka 29 – Výpočet bezrozměrných koeficientů (vzorek 4)

Měření 4	Symbol	hodnota	jednotka
Střední teplota v nádobě	t_s	32,85	°C
Hustota	ρ	994,78	kg·m ⁻³
Dynamická viskozita	η	$0,751 \cdot 10^{-3}$	kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹
Tepelná vodivost	λ	0,623	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Měrná tepelná kapacita	c_p	4180	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Gravitační zrychlení	g	9,81	m·s ⁻²
Součinitel objemové roztažnosti	β	$0,327 \cdot 10^{-3}$	K ⁻¹
Rozdíl teplot	ΔT	16,89	°C
Nusseltovo číslo	Nu	5467,666	-
Prandtlovo číslo	Pr	5,014	-
Grasshofovo číslo	Gr	$4,709 \cdot 10^{-13}$	-
Rayleighovo číslo	Ra	$2,374 \cdot 10^{-14}$	-

4.4 Stanovení obecného vztahu

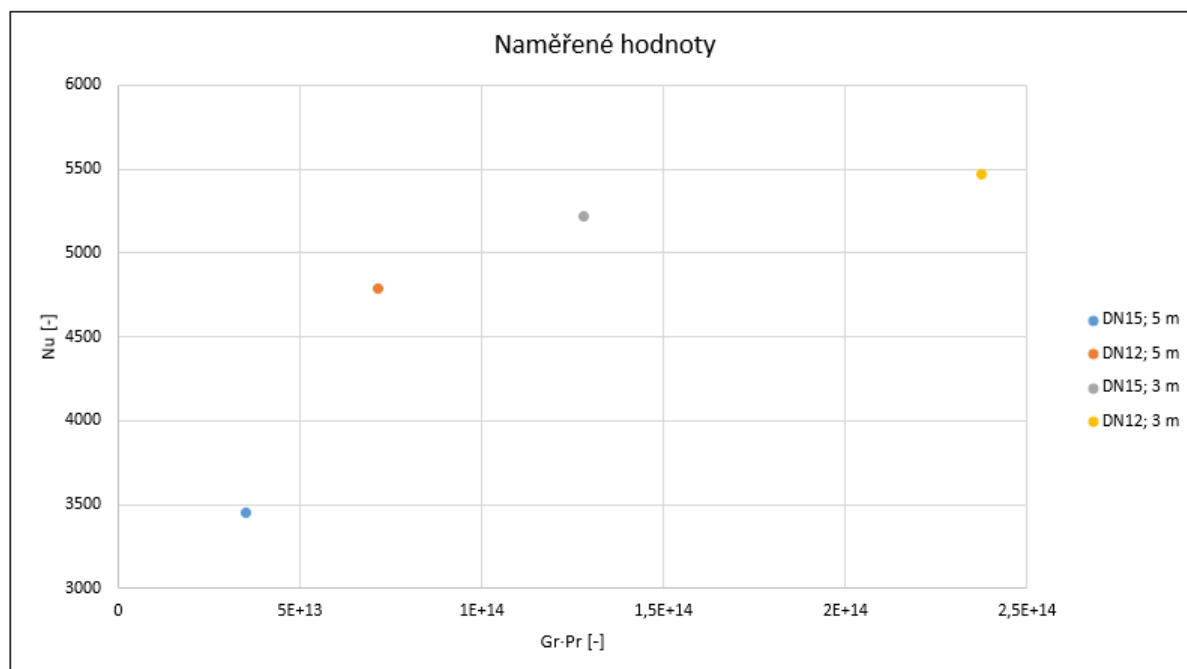
V této kapitole je hledána funkční závislost mezi naměřenými hodnotami součinitelů přestupu tepla vyjádřenými hodnotami jejich bezrozměrných koeficientů, které byly stanoveny v předchozí kapitole. Cílem je proložit získanou sadu dat křivkou, která vhodně vystihne trend, proces zvaný *curve fitting*. V tabulce 30 jsou pro přehlednost vypsány naměřené hodnoty Nusseltova a Rayleighova čísla pro každý vzorek. Tyto hodnoty jsou také vyznačené v grafu 11.

Tabulka 30 – Souhrn naměřených hodnot

			Nu	Ra
Měření 1	DN15	5 m	3450,442	$3,503 \cdot 10^{-13}$
Měření 2	DN12	5 m	4790,846	$7,140 \cdot 10^{-13}$
Měření 3	DN15	3 m	5219,357	$1,279 \cdot 10^{-14}$
Měření 4	DN12	3 m	5467,666	$2,374 \cdot 10^{-14}$

Optimálnost řešení je dosažena vhodnou aproximační metodou. Aproximací se obecně myslí nahrazení funkce $f(x)$ funkcí $\varphi(x)$ při předpokladu, že $f(x) \approx \varphi(x)$. Je tedy zřejmé, že pro každý z naměřených bodů bude existovat odpovídající bod s určitou odchylkou hodnot jedné z proměnných (závislá proměnná). Pro případ prokládání dat křivkou je běžně používaná aproximace **metodou nejmenších čtverců**, jejímž principem je minimalizace sumy druhé mocniny právě těchto odchylek [18]. Z grafu 11 lze vyvodit, že hledaná křivka bude popsána mocninnou funkcí, jejíž funkční předpis je udáván rovnicí 36.

$$Nu = A \cdot (Ra)^B \quad (36)$$



Graf 11 – Závislost naměřených bezrozměrných koeficientů

Ke stanovení aproximované funkce metodou nejmenších čtverců je použito dvou přístupů. Prvním přístupem je *lineární regrese* čili proložení datové sady přímkou danou funkčním předpisem popsaným rovnicí 37.[18]

$$y = A + B \cdot x \quad (37)$$

$$\ln(Nu) = \ln(A) + B \cdot \ln(Ra) \quad (38)$$

Aplikací známých vět o logaritmování, daných rovnicemi 39 a 40, na uvažovanou mocninnou funkci, je obdržena příslušná rovnice přímky 38. V této rovnici tedy budou jako vstupní hodnoty figurovat logaritmy hodnot naměřených dat.

$$\ln(x_1 \cdot x_2) = \ln(x_1) + \ln(x_2) \quad (39)$$

$$\ln(x^A) = A \cdot \ln(x) \quad (40)$$

Logaritmy naměřených hodnoty z tabulky 30 jsou uvedeny v následující tabulce 31. K logaritmizaci bylo využito přirozených logaritmů.

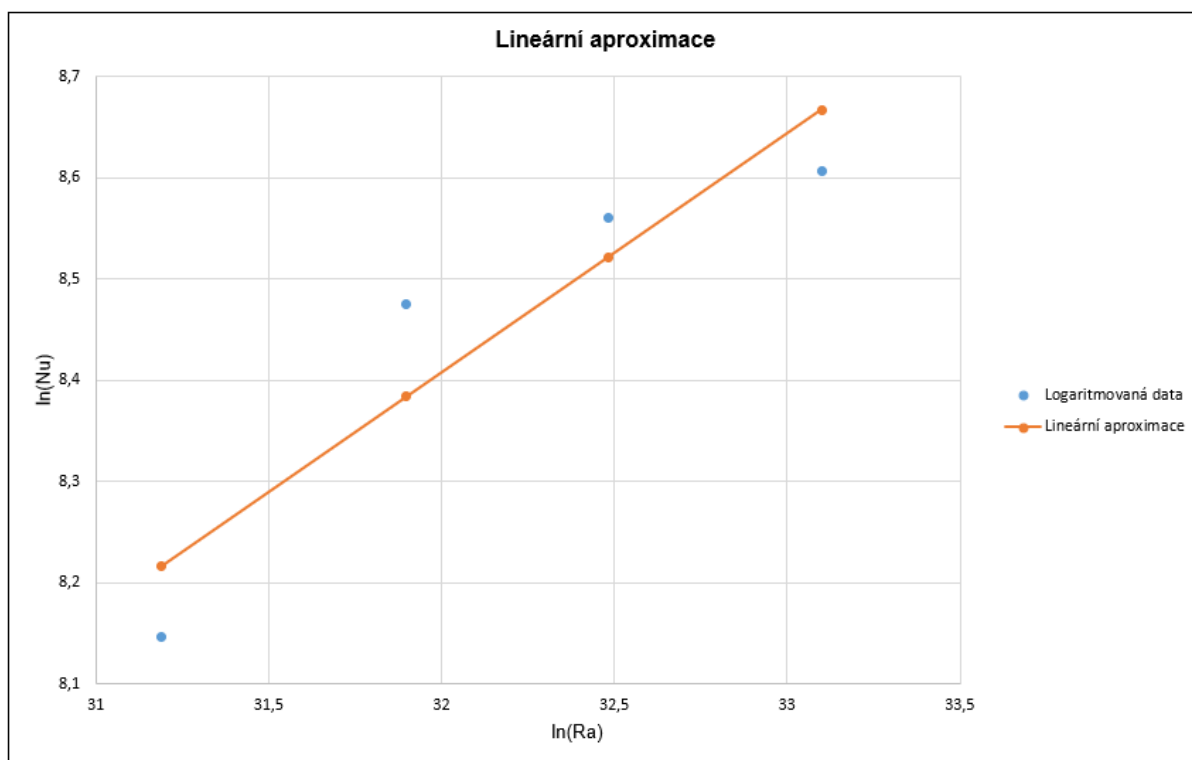
Tabulka 31 – Logaritmované hodnoty naměřených dat

	ln(Ra)	ln(Nu)
Měření 1	31,1874	8,14626
Měření 2	31,8993	8,47446
Měření 3	32,4821	8,56013
Měření 4	33,1008	8,60661

K samotné aproximaci je využito matematického softwaru MAPLE [17], kde k proložení dat přímkou slouží funkce *leastsquare* ve tvaru uvedeném na obrázku 17. Vstupními daty jsou logaritmované hodnoty naměřených dat z tabulky 31. Výstupy jsou pak hodnoty koeficientů A a B aproximované funkce. Aproximovaná přímka je dále znázorněna na grafu 12 na následující stránce.

```
> eqfit:=evalf(fit[leastsquare][x,y],y=a+b*x])([xval,yval]));
```

Obr. 17 Funkce aproximace metodou nejmenších čtverců v MAPLE [17]



Graf 12 – Lineární regrese

Ke stanovení koeficientů A a B mocninné funkce je potřeba odlogaritmovat obdržené koeficienty rovnice přímky. Lze tak učinit dle rovnice 41:

$$A = e^{\ln(A)} \quad (41)$$

Hledaný obecný vztah pro stanovení součinitele přestupu tepla je tak v tomto případě vyjádřen rovnicí 42. Hodnoty druhých mocnin odchylek naměřených a přibližných hodnot bezrozměrných koeficientů jsou uvedeny v tabulce 32 na následující stránce.

$$Nu = 2,376697 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,235678} \quad (42)$$

Tabulka 32 – Obdržené výsledky lineární regresní analýzy

	A	B	Nu (naměřené)	Nu (aprox.)	Odchylka	Čtverec odchylky
měření 1	2,376697	0,235678	3540,442	3699,322	248,880	61941,45
měření 2	2,376697	0,235678	4790,846	4375,077	-415,769	172864,30
měření 3	2,376697	0,235678	5219,357	5019,243	-200,114	40045,47
měření 4	2,376697	0,235678	5467,666	5807,107	339,441	115219,90
					Σ	390071,10

V dalším případě je ke stanovení aproximované funkce použita aplikace solver (řešitel) v tabulkovém editoru MS Excel [19]. Řešitele lze použít k řešení soustav rovnic o více neznámých. V tomto případě se jedná o nelineární regresní analýzu. Aproximovaná funkce tak bude mít mocninný předpis, konkrétně již dříve zavedený, popsaný následující rovnicí:

$$Nu = A \cdot (Ra)^B \quad (43)$$

Pro naměřené hodnoty Nu a Ra jsou hledány příslušné koeficienty A a B, dle principu metody nejmenších čtverců. V tabulce 33 jsou uspořádány všechny vstupní a výstupní údaje. Postup řešení je proveden v následujících krocích:

- Jsou zvoleny proměnné modelu, jimiž jsou právě hledané koeficienty A a B.
- Pro naměřené hodnoty Rayleighova čísla jsou hledány takové hodnoty proměnných, pro něž je účelová funkce (součet čtverců odchylek naměřených a aproximovaných hodnot Nusseltova čísla) minimální.
- Využito je gradientní metody, která dle pokynů softwaru slouží k řešení hladkých nelineárních problémů.

Tabulka 33 – Obdržené výsledky nelineární regresní analýzy

	Ra	Nu (naměřené)	Nu (aprox.)	Odchylka	Čtverec odchylky	A	B
	Ra · 10 ⁻¹⁴	-	-	-	-	-	-
měření 1	0,3504	3540,442	3808,606	358,164	128281,41	5,30983	0,21084
měření 2	0,7139	4790,846	4425,369	365,477	133573,64	5,30983	0,21084
měření 3	1,2788	5219,357	5003,968	215,384	46392,62	5,30983	0,21084
měření 4	2,3740	5467,666	5701,140	233,474	54510,23	5,30983	0,21084
				Σ	362757,90		

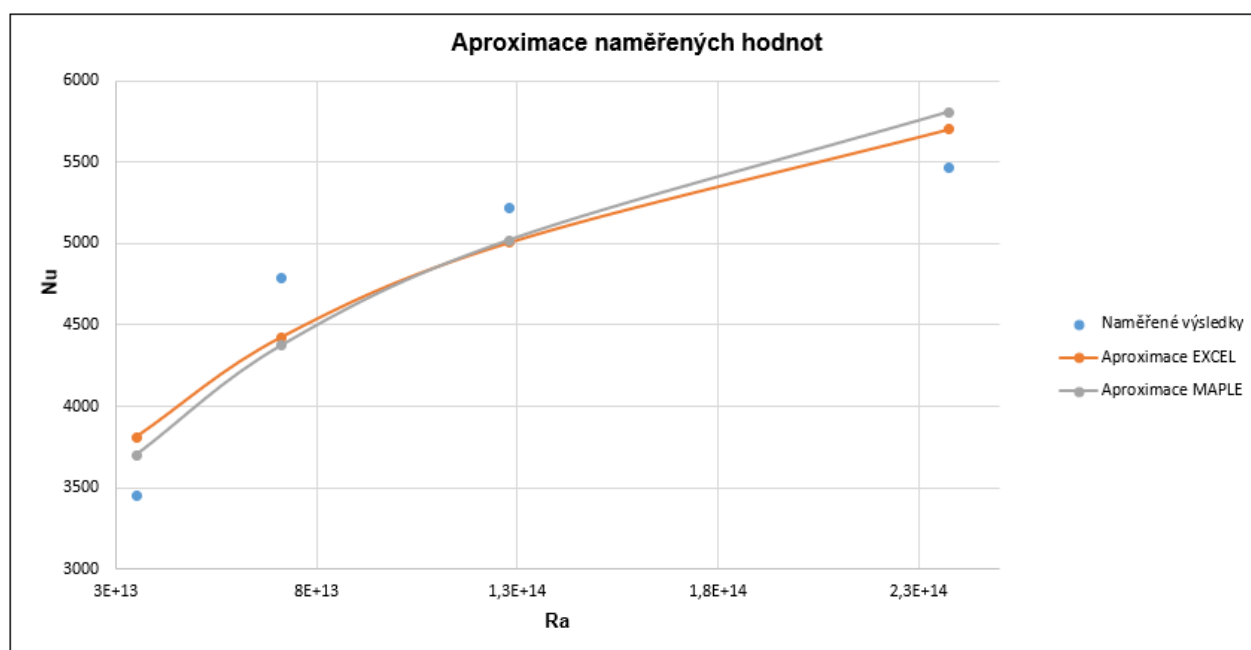
Vztah 44 pak vyjadřuje hledanou fyzikální závislost bezrozměrných čísel získanou nelineární regresní analýzou.

$$Nu = 5,30983 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,21084} \quad (44)$$

Tabulka 34 – Souhrn získaných obecných výpočtových vztahů

1	$Nu = 2,376697 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,235678}$
2	$Nu = 5,30983 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,21084}$

Obdržené funkční vztahy (tabulka 34) jsou znázorněny v grafu 12, kde lze sledovat rozdíly průběhů jednotlivých funkcí. Vzhledem k nižšímu součtu druhých mocnin odchylek se jako přesnější korelace jeví vztah číslo 2 odvozený nelineární regresní analýzou. Je však zřejmé, že by bylo vhodné obdržené výsledky zlepšit více naměřenými vzorky.



Graf 13 – Aproximované funkce (oběma přístupy)

Závěr

Cílem práce bylo stanovení tepelně-hydraulických vlastností vlnovcového flexibilního prvku. K dispozici nebyla experimentální data z předchozí práce s flexibilním prvkem, tudíž musel být v první fázi práce navrhnout a realizován adekvátní experiment, který tedy poslouží ke sběru dat. Navrhnutý experiment simuluje aplikace řešené v LENP. Experimentálně je řešen ohřev procesní kapaliny na zvolenou teplotu, kdy jsou trubky, svinuté přibližně do tvaru šroubovice, ponořeny do nádoby s chladnou statickou náplní. Jedná se o jednoduchou aplikaci, kterou lze v rozumném čase napodobit.

Po konzultaci s vedoucím práce a s vedoucím laboratoře bylo navrženo a provedeno několik měření, jejichž výstupem budou průběhy teplot chladné náplně na čase. Teploty budou měřeny v několika hladinách, jelikož se náplň v nádobě, při absenci míchání, bude postupně prohřívat od hladiny ke dnu. Měření budou probíhat pro různé geometrické konfigurace tepelného prvku. Lišit se budou délkami a průměry, přičemž budou měřeny alespoň čtyři kombinace délek a průměrů pro stanovení korelací jejich tepelně-hydraulických vlastností.

K dispozici bylo pouze vybavení Laboratoře energeticky náročných procesů. Mobilní pult s čerpadlem, průtokoměrem, měřičem tepla a dvěma teploměry, propojen se zásobníkem vody hadicemi, a spojovacími prvky s měřeným výměníkem, který je ponořen v nádobě s chladnou kapalinou, tvoří primární (měřicí) okruh. Voda v zásobníku musí být ohřáta na požadovanou teplotu. K tomuto účelu sloužil sekundární okruh, tvořený čerpadlem, kotlem a svazkem trubek ponořených do zásobníku. Sekundární okruh navíc sloužil k udržování teploty v zásobníku během samotného měření. Snaha byla udržet tuto teplotu konstantní.

V posledním kroku byla analyzována naměřená data. Nejprve byly zaneseny do přehledných grafů. Bylo rozhodnuto, že se bude stanovovat korelace součinitelů přestupu tepla na straně chladného média, kde dochází k šíření tepla volnou konvekcí. Součinitel přestupu tepla byl stanoven na základě tepelné bilance, a spolu s příslušnými fyzikálními vlastnostmi kapaliny byl dosazen do známých bezrozměrných vztahů. Pro danou aplikaci musel být navíc, z důvodu nekonvenčního uspořádání, definován charakteristický rozměr.

Výstupem z analýzy byly čtyři body, závislosti vybraných bezrozměrných koeficientů. Následovala fáze aproximace. Ta spočívala v proložení těchto bodů funkcí s předem definovaným funkčním předpisem. Zvolenou metodou aproximace byla metoda nejmenších čtverců, jejíž principem je hledání nejmenšího součtu druhých mocnin odchylek. Byly použity dva přístupy, lineární a nelineární, které daly dvě různá řešení. Řešením jsou tedy dvě kritériální rovnice.

Odvozené kritériální rovnice platí vzhledem k nově definovanému charakteristickému rozměru pouze pro danou aplikaci, což však je pro potřeby LENP zcela dostačující. Při realizaci experimentu bylo použito flexibilních prvků různých délek, které tak byly svinuty do šroubovice s různým stoupáním (vždy do stejné výšky nádoby). To způsobilo různé hydrodynamické podmínky v náplni, což vysvětluje rozdílné průběhy teplot ohřívání náplně. Je tak zřejmé, že parametr stoupání šroubovice se výrazně projevil v obdržení výsledcích.

I když bylo v rámci diplomové práce obdrženo pouze minimální množství měřených dat, tak posloužilo pro základní stanovení funkční závislosti. Obdržený výsledek lze považovat za vyhovující, protože byl identifikován praktický způsob odvození součinitele přestupu tepla pro konkrétní aplikaci. Obdrženou funkční závislost doporučuji v budoucnosti zpřesnit pomocí více získaných dat, ideálně pro více délek flexibilního prvku, z důvodu zmíněným výše. Navíc doporučuji proměřit do úplného prohřátí nádrže, se zachování hydraulických poměrů v náplni.

Seznam zdrojů

- [1] Montážní systém z nerezových ohebných trubek xConnect System: Technologický předpis TP 4001. 4001-CZ-2016-03. Čermákovice, 2017.
- [2] *Potrubní systém xConnect: Technické parametry* [online]. [cit. 2019-10-03]. Dostupné z: <https://www.flexira.eu/cs/sortiment/potrubni-system-xconnect/parametry>
- [3] ČERNÝ, M. Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984, 264 s.
- [4] N., Arlt, Burkert A. a Isecke B. Korozivzdorné oceli ve styku s jinými kovovými materiály [online]. Brüssel: Euro Inox, 2011 [cit. 2019-10-03]. ISBN 978-2-87997-324-1. Dostupné z: http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Contact_with_Other_CZ.pdf
- [5] PŘIKRYL, Pavel. Tlakové ztráty v potrubí moderního typu. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jakub Elcner, Ph.D.
- [6] HOLEČEK, Tomáš. Tlakové ztráty. In: Flexira: potrubní systém [online]. [cit. 2019-10-03]. Dostupné z: <https://www.flexira.eu/docs/pressure-drop.xlsm>
- [7] VONDRA, Marek. Zařízení pro zahušťování odpadní vody z bioplynových stanic. Brno, 2017. Dizertační práce. Vysoké Učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
- [8] WICHTERLE, Kamil a Marek VEČEŘ. Základy procesního inženýrství. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava [online]. 2010 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~wih15/ProcIng/ESF_ZaklProcIng.pdf
- [9] JEGLA, Zdeněk. Návrh tepelných zařízení se změnou fáze pracovní látky: Reboilery, kondenzátory, odparky. Brno, 2017.
- [10] PAVELEK, Milan a kolektiv. *Termomechanika*. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [11] ŠOB, František. *Hydromechanika*. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-214-3578-0.
- [12] GREEN, Don a Robert PERRY. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8th. McGraw-Hill Education - Europe, 2007. ISBN 0071422943.
- [13] The Engineering Toolbox: Water - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d_595.html

- [14] The Engineering Toolbox: Water - Heat Capacity (Specific Heat) [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-water-d_660.html
- [15] The Engineering Toolbox: Water - Dynamic and Kinematic Viscosity [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html
- [16] Fluid Properties Calculator [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.mhtl.uwaterloo.ca/old/onlinetools/airprop/airprop.html>
- [17] WATERLOO MAPLE INC. *Maple 17.3.2013*
[Požadavky na systém: Intel Pentium III 1 GHz, amd64 (x86-64), operační systém Microsoft Windows, XP, Vista, Windows 7, Windows 8, volné místo na disku 4 GB, operační paměť 2 GB]
- [18] ČERMÁK, Libor a Rudolf HLAVIČKA. Numerické metody. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-214-3752-4.
- [19] MICROSOFT CORPORATION. *Microsoft Excel 2019*. 24.9.2019, 2018
[Požadavky na systém: 1,6 GHz nebo rychlejší, dvoujádrový, operační systém Microsoft Windows 10, volné místo na disku 2 GB, operační paměť 2 GB]

Tabulky

označení	strana	
Tabulka 1	9	Rozměry dodávaných flexibilních prvků
Tabulka 2	10	Rozměrové tolerance flexibilního prvku
Tabulka 3	11	Rozměry slisovaných zakončení trubek
Tabulka 4	12	Maximální provozní tlaky vybraných trubek a médií
Tabulka 5	12	Minimální přípustný poloměr ohybu trubky
Tabulka 6	13	Materiály jednotlivých komponentů
Tabulka 7	24	Vstupní parametry experimentu
Tabulka 8	26	Konfigurace měřených flexibilních prvků
Tabulka 9	30	Použitá měřicí zařízení
Tabulka 10	30	Všechna provedená měření
Tabulka 11	31	Používaná symbolika
Tabulka 12	32	Naměřená data (vzorek 1)
Tabulka 13	33	Naměřená data (vzorek 2)
Tabulka 14	34	Naměřená data (vzorek 3)
Tabulka 15	35	Naměřená data (vzorek 4)
Tabulka 16	36	Naměřená data – opakované měření (vzorek 4)
Tabulka 17	38	Používané fyzikální tabulky
Tabulka 18	41	Součinitel prostupu tepla (vzorek 1)
Tabulka 19	41	Součinitel prostupu tepla (vzorek 2)
Tabulka 20	42	Součinitel prostupu tepla (vzorek 3)
Tabulka 21	42	Součinitel prostupu tepla (vzorek 4)
Tabulka 22	42	Celková předaná tepelná energie
Tabulka 23	43	Vstupní data – volná konvekce (vzorek 1)
Tabulka 24	44	Součinitel přestupu tepla – volná konvekce (vzorek 1)
Tabulka 25	47	Zvolené charakteristické rozměry
Tabulka 26	48	Výpočet bezrozměrných koeficientů (vzorek 1)
Tabulka 27	48	Výpočet bezrozměrných koeficientů (vzorek 2)
Tabulka 28	49	Výpočet bezrozměrných koeficientů (vzorek 3)
Tabulka 29	49	Výpočet bezrozměrných koeficientů (vzorek 4)
Tabulka 30	50	Souhrn naměřených hodnot
Tabulka 31	51	Logaritmované hodnoty naměřených dat
Tabulka 32	53	Obdržené výsledky lineární regresní analýzy
Tabulka 33	53	Obdržené výsledky nelineární regresní analýzy
Tabulka 34	54	Souhrn získaných obecných výpočtových vztahů

Grafy

označení	strana	
Graf 1	32	Teplotní charakteristiky (vzorek 1)
Graf 2	33	Teplotní charakteristiky (vzorek 2)
Graf 3	34	Teplotní charakteristiky (vzorek 3)
Graf 4	35	Teplotní charakteristiky (vzorek 4)
Graf 5	36	Teplotní charakteristiky – opakované měření (vzorek 4)
Graf 6	37	Porovnání teplotních charakteristik měření vzorku 4
Graf 7	39	Hustota vody jako funkce teploty
Graf 8	46	Charakteristický rozměr 1 (průměr trubky)
Graf 9	46	Charakteristický rozměr 2 (stoupání šroubovice)
Graf 10	47	Charakteristický rozměr 3 (zahrnuty oba parametry)
Graf 11	50	Závislost naměřených bezrozměrných koeficientů
Graf 12	52	Lineární regrese
Graf 13	54	Aproximované funkce (oběma přístupy)

Obrázky

Obrázek 1	Geometrie flexibilního prvku
Obrázek 2	Slisovaný konec flexibilního prvku
Obrázek 3	Opláštění pro zvýšení chemické odolnosti trubky
Obrázek 4	Příklad práce se souborem k určení hydraulických ztrát
Obrázek 5	Vlnovcový flexibilní prvek jako tepelný výměník
Obrázek 6	Detail experimentální odpařovací jednotky Ing. Mgr. Vondry Ph.D.
Obrázek 7	Prostup tepla rovinnou stěnou
Obrázek 8	Předpokládaný průběh teplot ohřevu statické náplně
Obrázek 9	Uložení topného hadu v plastové nádobě
Obrázek 10	Umístění teploměrů v nádobě
Obrázek 11	Pákový lis (T120)
Obrázek 12	Řezák O&T 250
Obrázek 13	Svinutí flexibilního prvku do tvaru šroubovice
Obrázek 14	Detail potrubní trasy mobilního pultu
Obrázek 15	Schéma potrubní trasy a rozmístění instrumentace
Obrázek 16	Příčný průřez uspořádání topného hadu v nádobě
Obrázek 17	Funkce aproximace metodou nejmenších čtverců v MAPLE

Symbols

Symbol	Význam	Jednotka
A	teplosměnná plocha	m ²
α	součinitel přestupu tepla	W·m ⁻² ·K ⁻¹
b	šířka slisovaných vln	m
c _p	tepelná kapacita za konstantního tlaku	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
D _H	hydraulický průměr	m
δ	tloušťka stěny	m
ΔT	teplotní spád	K
Gr	Grasshofovo číslo	-
ID	vnitřní průměr	m
L	charakteristický rozměr	m
Λ	tepelná vodivost	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
m	hmotnost	kg
\dot{m}	hmotnostní tok	kg·s ⁻¹
ν	kinematická viskozita	kg·m ⁻²
η	dynamická viskozita	kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹
Nu	Nusseltovo číslo	-
OD	vnější průměr	m
ρ	roztečná vzdálenost	m
\dot{q}	měrný tepelný tok	W·m ⁻²
Q _v	objemový průtok	l·s ⁻¹
Pr	Prandltovo číslo	-
Ra	Rayleighovo číslo	-
Re	Reynoldsovo číslo	-
Re _k	Kritické reynoldsovo číslo	-
ρ	hustota	kg·m ⁻³
S	měrný povrch	m ² ·m ⁻¹
t	čas	s
T _{C0}	počáteční teplota chladného média	K
T _{C1}	Teplota chladného média u dna náplně	K
T _{C2}	Teplota chladného média uprostřed náplně	K
T _{C3}	Teplota chladného média na hladině náplně	K
T _{Cf}	koncová teplota chladného média	K
T _H	teplota horkého média	K
T _{H1}	Teplota proudění horkého média na vstupu	K
T _{H2}	Teplota proudění horkého média na výstupu	K
T _w	teplota povrchu stěny	K
T _∞	teplota mimo stěnou ovlivněnou oblast	K
u	rychlost proudění	m·s ⁻¹
U	součinitel prostupu tepla	W·m ⁻² ·K ⁻¹
V	měrný průměr	m ³ ·m ⁻¹